



# Conservation de l'énergie sur des environnements de réseaux d'accès radio hétérogènes : vers des réseaux auto-organisés et verts

Takoua Ghariani

## ► To cite this version:

Takoua Ghariani. Conservation de l'énergie sur des environnements de réseaux d'accès radio hétérogènes : vers des réseaux auto-organisés et verts. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Institut National des Télécommunications, 2014. Français. NNT : 2014TELE0023 . tel-01172616

**HAL Id: tel-01172616**

**<https://theses.hal.science/tel-01172616>**

Submitted on 7 Jul 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**THESE DE DOCTORAT CONJOINT TELECOM SUDPARIS et L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE**

**Spécialité : Informatique et Télécommunications**

**Ecole doctorale : Informatique, Télécommunications et Electronique de Paris**

**Présentée par**

**Takoua GHARIANI**

**Pour obtenir le grade de  
DOCTEUR DE TELECOM SUDPARIS**

**CONSERVATION DE L'ENERGIE SUR DES ENVIRONNEMENTS DE RESEAUX  
D'ACCES RADIO HETEROGENES**

**VERS DES RESEAUX AUTO-ORGANISANTS ET VERTS**

Soutenue le 30/09/2014

Devant le jury composé de :

Pr. Pascal LORENZ	Professeur à l'Université de Haute-Alsace	Rapporteur
Dr. Loutfi NUAYMI	Maître de Conférences à TELECOM Bretagne	Rapporteur
Pr. Véronique VEQUE	Professeur à l'Université de Paris Sud	Examineur
Pr. Guy PUJOLLE	Professeur à l'Université de Paris 6 « Pierre et Marie Curie »	Examineur
Pr. Khaldoun AL AGHA	CEO Green Communications Professeur à l'Université de Paris Sud	Examineur
Pr. Steven Martin	Professeur à l'Université de Paris Sud	Invité
Pr. Djamal ZEGHLACHE	Professeur à TELECOM SudParis	Directeur de Thèse
Dr. Badii JOUABER	Maître de Conférences à TELECOM SudParis	Encadrant

Thèse n° 2014TELE0023



# Remerciements

Je tiens à exprimer tout d’abord mes remerciements à mes rapporteurs et membres du jury, qui ont accepté d’évaluer ce travail de thèse : Pr. Pascal LORENZ, Dr. Loutfi NUAYMI, Pr. Véronique VEQUE, Pr. Khaldoun AL AGHA, Pr. Steven Martin et Pr. Guy PUJOLLE.

J’adresse mes très sincères et profonds remerciements à mon encadrant Dr. Badii JOUABER pour sa disponibilité tout au long de ces trois années de travail au sein de son équipe, pour ses conseils qui m’ont permis de mener à bien cette thèse. Merci au Pr. Djamal ZEGHLACHE pour avoir accepté de diriger cette thèse et pour m’avoir accueilli au sein du département RS2M de Telecom SudParis et de m’avoir donné l’opportunité de réaliser ce travail de recherche.

Un merci sans égal à mon père Sadok, ma mère Henda, mes sœurs Souha et Emna, mon frère Seif, mon cher mari Maher Mkhinini et tous mes amis (Mehdi, Indira, Ahlem) pour leur irremplaçable et inconditionnel soutien et qui, sans eux, aucune réussite n’aurait été possible.

Enfin, j’adresse toute ma gratitude et reconnaissance à ceux qui ont contribué à la relecture de mon manuscrit et à son amélioration, en particulier Meriem Zekri.



# Abstract

Since the last decades, environmental issues are becoming among the major concerns for most human activities, including the Information and Communication Technologies (ICT) sector. This will surely influence upcoming networking technologies, architectures and usage practices. New approaches and methodologies are required in order to evaluate and to reduce the Carbon Footprint toward what is commonly denoted as Green Networks.

Within the ICT sector, the main efforts are related to energy saving techniques. These efforts started in early stages within wireless technologies, mainly because of energy limitations on mobile devices such as mobile phones and wireless sensors. Additionally, because of health considerations, standardization bodies and government had set stringent policies and limits on electromagnetic radiation levels that can be emitted by radio stations.

For these reasons, many academic and industrial research and development activities had led to a number of relatively energy efficient solutions. The main visible examples include cellular networks, wireless sensors and wireless sensor networks.

Today, the community is seeking additional enhancements at both technological and architectural levels. Energy efficient optimization approaches are required in order to reduce energy consumption not only at the radio access networks, but from the end-to-end view.

In this thesis, we consider energy efficiency in the context of Heterogeneous Wireless Access Networks (HetNet). These are composed of multi-standards wireless network solutions (e.g. 2G, LTE, WiFi, WiMax, etc.), with non uniform topologies and cell sizes (Macro Cells and Small Cells) and Multi-Modal mobile terminals able to manage simultaneously different connections.

The main contributions of our studies include the proposal of new optimization solutions regarding user association and scheduling techniques at both flow and packet levels for multi-homed mobile terminals. An overall context-based solution is also proposed in order to provide end-to-end energy efficient networking solutions.



# Résumé

La préservation de l'environnement et des ressources naturelles pour les prochaines générations est aujourd'hui considérée comme un des axes les plus prioritaires dans presque tous les secteurs économiques. Désormais, il existe une mobilisation générale dans tous les secteurs afin d'identifier et d'analyser l'impact de nos activités, pour ensuite trouver les solutions adéquates permettant de limiter et/ou de réduire leurs effets nuisibles sur l'environnement.

Le secteur des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) est loin d'être épargné de cette tendance écologique et ce pour différentes raisons dont certaines lui sont propres. Si de façon générale, les raisons sont essentiellement écologiques, pour le domaine des TIC, et particulièrement pour les technologies sans fil que nous considérons dans cette thèse, il existe aussi des raisons intrinsèques qui poussent encore plus loin les attentes en termes d'efficacité énergétique. En effet, l'utilisation de l'interface radio, qui fonctionne le plus souvent en mode diffusion, est soumise à des règles et à des standards encadrant les niveaux de rayonnements électromagnétiques des antennes et par conséquent les puissances d'émissions autorisées. Un autre facteur propre au domaine des réseaux sans fil, provient de la capacité, encore très limitée, des batteries embarquées sur les terminaux et équipements mobiles (e.g. smart phones, tablettes, capteurs). Cette limitation a poussé très tôt, et bien avant la prise de conscience écologique, les communautés industrielles et de recherche à penser des solutions très économes en termes de consommation d'énergie. Ceci s'est traduit par des protocoles et des techniques assez avancées (e.g. signalisation et partage de ressources dans les réseaux cellulaires, accès et routage dans les réseaux de capteurs, circuit intégrés à faible consommation d'énergie). Cependant, avec les évolutions continues dans ce domaine, aussi bien en termes de technologie que d'usage, la maîtrise de la consommation d'énergie reste d'actualité et nécessite encore beaucoup d'efforts d'analyse et d'optimisation.

Nous considérons dans cette thèse la problématique de la conservation d'énergie dans le contexte technologique actuel caractérisé par :

- La coexistence d'une multitude de technologies d'accès sans fil (2G, 3G, 4G, WiFi, WiMax, etc.) avec des topologies mariant Macro et Micro cellules et offrant un environnement riche et dynamique
- Des terminaux mobiles multimodaux avec de plus en plus de capacités de traitement
- Limitations persistantes des sources d'énergie sur les équipements mobiles (capacités des batteries)
- Evolution continue des usages en mobilité (natures et nombre des flux de données)



Dans ce contexte très riche, les possibilités offertes aux usagers sont à double tranchant. D'un côté, elles peuvent très bien améliorer la QoS en offrant toujours la meilleure connectivité en fonction du contexte de l'utilisateur. D'un autre côté, et sans une bonne optimisation de la consommation d'énergie sur le terminal, la disponibilité de celui-ci peut vite diminuer (et donc faire baisser la QoE) à cause de l'énergie nécessaire pour gérer et exploiter plusieurs interfaces radio en parallèle.

Nous considérons essentiellement les liens entre les stations de base (ou les point d'accès) et les terminaux mobiles. Notre objectif étant d'analyser la consommation d'énergie sur ces liens pour ensuite proposer des contributions permettant de mieux la maîtriser dans le contexte considéré. Nous focalisons essentiellement sur l'exploitation des multiples interfaces et du multi-flux pour étudier, analyser et proposer des solutions dynamiques et adaptatives d'ordonnancement, de sélection et de gestion d'interfaces minimisant la consommation d'énergie.

# TABLE DES MATIERES

<b>I. INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>17</b>
I.1 CONTEXTE ET MOTIVATIONS.....	17
I.2 EVOLUTION DES RESEAUX SANS FIL ET CELLULAIRES .....	19
I.2.1 Evolution technologiques et architecturales .....	19
I.2.1.1 Famille IEEE 802.11x.....	19
I.2.1.2 Famille 3GPP.....	20
I.2.2 Autres évolutions technologiques .....	22
I.2.2.1 Coexistence et environnement hétérogène.....	22
I.2.2.2 Terminaux multi-modes.....	22
I.2.2.3 Protocoles multi-chemin .....	23
I.3 COEXISTENCE, COMPLEXITE ET CONCEPT DE RESEAUX AUTO-ORGANISES.....	24
I.3.1 Principe et intérêt du concept de réseaux auto-organisant.....	24
I.3.2 Réseaux LTE auto-organisés.....	26
I.3.3 Vers les réseaux 5G.....	27
I.4 ORGANISATION ET CONTRIBUTIONS DE LA THESE .....	29
I.5 PUBLICATIONS DE L'AUTEUR .....	30
<b>II. ETAT DE L'ART.....</b>	<b>31</b>
II.1 INTRODUCTION.....	31
II.2 CONSERVATION D'ENERGIE SUR LES TERMINAUX MOBILES .....	33
II.2.1 Etats des Interfaces Radio selon les standards.....	33
II.2.2 Modèles énergétiques .....	35
II.2.2.1 Modèles énergétiques pour la famille IEEE 802.11x.....	35
II.2.2.2 Modèles énergétiques pour les normes 3GPP .....	39
II.2.2.3 Etudes comparatives .....	40
II.2.2.4 Synthèse .....	41
II.2.3 Techniques d'optimisation d'énergie .....	45
II.2.3.1 Sélection d'interface .....	45
II.2.3.2 Gestion de l'activité des interfaces radio .....	47
II.2.3.3 Le contrôle de puissance .....	48
II.3 OPTIMISATION DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE AU NIVEAU DU RESEAU D'ACCES .....	49
II.3.1 Modèles énergétiques .....	49
II.3.2 Solutions d'optimisation .....	50
II.3.2.1 Techniques d'endormissement.....	50
II.3.2.2 Mécanismes d'ordonnancement.....	51
II.3.2.3 Association des utilisateurs.....	52
II.3.2.4 Solutions combinées .....	53
II.4 METRIQUE D'EFFICACITE ENERGETIQUE.....	53
II.5 CONCLUSIONS .....	56
<b>III. CONTRIBUTION I: OPTIMISATION DE L'ORDONNANCEMENT UP LINK SUR DES ENVIRONNEMENTS D'ACCES RADIO HETEROGENES.....</b>	<b>57</b>
III.1 INTRODUCTION.....	57
III.2 ORDONNANCEMENT ET CONSERVATION D'ENERGIE DANS LES RESEAUX HETEROGENES .....	58
III.2.1 Critères de décision.....	60
III.2.2 Algorithmes d'ordonnancement.....	62
III.3 OPTIMISATION DE L'ORDONNANCEMENT UpLINK MINIMISANT LA CONSOMMATION D'ENERGIE.....	65
III.3.1 Métriques énergétiques et modèle de consommation d'énergie .....	68
III.3.2 Simulation et Evaluation de Performances .....	72

III.4	CONCLUSIONS .....	77
<b>IV.</b>	<b>CONTRIBUTION 2 : GESTION ET SELECTION D'INTERFACES SUR DES ENVIRONNEMENTS DE RESEAUX D'ACCES SANS FIL HETEROGENES.....</b>	<b>79</b>
IV.1	INTRODUCTION.....	79
IV.2	ECOWISM : UNE SOLUTION DE GESTION D'INTERFACES MINIMISANT LA CONSOMMATION D'ENERGIE SUR LES TERMINAUX MOBILES .....	81
IV.2.1	Axe 1 : Métriques de décision.....	82
IV.2.2	Axe 2 : Méthodologie de décision pour la gestion et la sélection d'interfaces .....	83
IV.2.3	Gestion d'interfaces .....	85
IV.2.4	Axe 3 : Solutions architecturales et optimisation.....	86
IV.2.4.1	Module de gestion de services .....	87
IV.2.4.2	Module d'estimation de la consommation d'énergie .....	87
IV.2.4.3	Module de gestion de sessions .....	88
IV.2.4.4	Module de collecte de contexte.....	89
IV.2.4.5	Solution globale et Virtualisation .....	90
IV.3	EVALUATION DE PERFORMANCES .....	91
IV.4	CONCLUSIONS .....	97
<b>V.</b>	<b>ASSOCIATION DYNAMIQUE DES UTILISATEURS ET TECHNIQUES D'ORDONNANCEMENT DANS LES RESEAUX AUTO-ORGANISES LTE .....</b>	<b>99</b>
V.1	INTRODUCTION.....	99
V.2	SOLUTIONS EXISTANTES POUR L'ASSOCIATION DES UTILISATEURS DANS LES RESEAUX AUTO-ORGANISES LTE .....	102
V.3	CONTRIBUTION 3 : ASSOCIATION DYNAMIQUE DES UTILISATEURS AVEC UN COMPROMIS EFFICACITE SPECTRALE / CONSOMMATION ENERGETIQUE .....	104
V.3.1	Métriques d'association.....	104
V.3.2	Algorithme d'association dynamique des utilisateurs .....	107
V.3.3	Evaluation de Performances .....	110
V.3.3.1	Environnement et paramètres de simulation .....	110
V.3.3.2	Résultats de performances .....	111
V.4	CONTRIBUTION 4 : ORDONNANCEMENT DL : ANALYSE ET EVALUATION DES PERFORMANCES ENERGETIQUES .....	116
V.4.1	Algorithmes d'ordonnancement existants .....	116
V.4.1.1	Round Robin (RR) .....	116
V.4.1.2	Proportional Fair (PF) .....	117
V.4.1.3	Modified Largest Weighted Delay First (MLWDF) .....	117
V.4.1.4	Exponential Proportional Fair (EXP -PF) .....	118
V.4.1.5	Max CQI .....	118
V.4.2	Evaluation des algorithmes d'ordonnancement.....	118
V.4.2.1	Les métriques d'évaluation .....	119
V.4.2.2	Simulation et résultats .....	120
V.4.2.1	Synthèse .....	125
V.5	CONCLUSIONS .....	126
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>128</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>130</b>

# Liste des figures

FIGURE 1: REPARTITION DES EMISSIONS EN CO <sub>2e</sub> DANS LE SECTEUR DES TELECOMMUNICATIONS POUR 2002 ET ESTIMATIONS POUR 2020 (TRADUIT DE [1]).....	18
FIGURE 2: ALLOCATION DE RESSOURCES OFDMA/SC-FDMA .....	21
FIGURE 3: THE 4A VISION: “ANYTIME, ANYWHERE, BY ANYONE AND ANYTHING”[19].....	24
FIGURE 4: EXEMPLE D’OPTIMISATION AU SEIN DES RESEAUX HETEROGENES.....	28
FIGURE 5: APPROCHES DE CONSERVATION D'ENERGIE DANS LES RESEAUX SANS FIL .....	32
FIGURE 6:TRANSMISSION D'UN PAQUET AVEC LE MECANISME DCF.....	36
FIGURE 7: ORDONNANCEMENT PAQUET VERSUS FLUX.....	59
FIGURE 8: ALGORITHME D'ORDONNANCEMENT ECO-ENERGETIQUE.....	67
FIGURE 9: GRILLE DE RESSOURCES POUR LA VOIE MONTANTE [77] .....	71
FIGURE 10: CONSOMMATION D'ENERGIE POUR L'INTERFACE RADIO LTE.....	74
FIGURE 11: CONSOMMATION D'ENERGIE CUMULEE.....	75
FIGURE 12: ENERGIE INUTILE DE L'INTERFACE WiFi (COUVERTURE TOTALE DE 15%).....	76
FIGURE 13: ENERGIE INUTILE DE L'INTERFACE WiFi (COUVERTURE TOTALE DE 50%).....	76
FIGURE 14: MACHINES A ETAT DES INTERFACES CELLULAIRES ET WiFi .....	80
FIGURE 15: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU GESTIONNAIRE DES SERVICES (FLUX) .....	87
FIGURE 16: MODULE DE GESTION DE SESSIONS « SESSION MONITORING PROCESS ».....	89
FIGURE 17:ARCHITECTURE DE L'AGENT ECO-WISM.....	91
FIGURE 18: UNE ARCHITECTURE OVERLAY SUR DEUX NIVEAUX D’ABSTRACTION [84] .....	92
FIGURE 19:MODULE DE GESTION DE SERVICES ( <i>SERVICE MONITORING PROCESS</i> ).....	93
FIGURE 20: « <i>GATHERING CONTEXT MODULE</i> » & « SESSION MONITORING MODULE ».....	94
FIGURE 21: CONSOMMATION MOYENNE D'ENERGIE (EN JOULE) AVEC ET SANS ECO-WISM.....	96
FIGURE 22: ENERGIE INSTANTANEE (EN J) AVEC ET SANS ECO-WISM EN FONCTION DU TEMPS (EN S).....	97
FIGURE 23: COEXISTENCE DE CELLULES DE TAILLES DIFFERENTES DANS LES RESEAUX HETEROGENES.....	100
FIGURE 24: DIMINUTION DE LA PUISSANCE MOYENNE DE L'ENSEMBLE DES STATIONS DE BASE AVEC ET SANS LA METRIQUE GREEN TOPOLOGICAL POTENTIAL .....	112
FIGURE 25: DEBIT UTILE MOYEN PAR UTILISATEUR EN FONCTION DU NOMBRE DES UTILISATEURS.....	113
FIGURE 26: DELAIS MOYENS PAR UTILISATEUR EN FONCTION DU NOMBRE DES UTILISATEURS.....	114
FIGURE 27: COMPARAISON DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DU RESEAU ENTRE LES DIFFERENTES APPROCHES EN FONCTION DU NOMBRE D’UTILISATEURS .....	115
FIGURE 28:COMPARAISON DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE COTE UTILISATEURS ENTRE LES DIFFERENTES APPROCHES .....	116
FIGURE 29: PERFORMANCES DES ORDONNANCEUR MAX CQI, PF ET RR .....	119
FIGURE 30: TOPOLOGIE DU RESEAU D'EVALUATION.....	120
FIGURE 31: DEBIT MOYEN PAR UTILISATEUR POUR LES FLUX BE.....	121
FIGURE 32:DEBIT MOYEN PAR UTILISATEUR POUR LES FLUX RT .....	122
FIGURE 33: INDICATEUR D’EQUITE « JAIN FAIRNESS INDEX » POUR LES FLUX RT .....	123

FIGURE 34: INDICATEUR D'EQUITE « JAIN FAIRNESS INDEX » POUR LES FLUX BE.....	123
FIGURE 35: EFFICACITES ENERGETIQUE [W/KBPS] .....	124
FIGURE 36: ENERGIE DE TRANSMISSION MOYENNE PAR UTILISATEUR .....	125

# Liste des tableaux

TABLEAU 1: CQI [10] .....	22
TABLEAU 2: PUISSANCE (mW) DES DIFFERENTS ETATS DES INTERFACES WLAN.....	38
TABLEAU 3: CLASSIFICATION DES MODELES ENERGETIQUES .....	42
TABLEAU 4: PUISSANCES MESUREES PENDANT LES DIFFERENTS ETATS DES INTERFACES (WiFi, 2G, 3G, LTE ET BLUETOOTH).....	44
TABLEAU 5: LES VALEURS DES PARAMETRES DU MODELE ENERGETIQUE POUR LES DIFFERENTS TYPES DE STATIONS DE BASE.....	50
TABLEAU 6: METRIQUES D'EFFICACITE ENERGETIQUE .....	55
TABLEAU 7: ALGORITHMES D'ORDONNANCEMENT DE PAQUETS .....	64
TABLEAU 8: PARAMETRES DE SIMULATION .....	74
TABLEAU 9: CONSOMMATION D'ENERGIE EN FONCTION DE LA TAILLE DES DONNEES POUR DIFFERENTS INTERFACES .....	83
TABLEAU 10: CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS TYPES DE CELLULES DANS LES RESEAUX LTE HETNET .....	101
TABLEAU 11: PUISSANCE MOYENNE DES DIFFERENTS COMPOSANTS DES STATIONS DE BASE DE TYPES MACRO, MICRO ET FEMTO[49], [50].....	106
TABLEAU 12: PUISSANCE DEPENDANTE ET INDEPENDANTE DE LA CHARGE DES STATIONS DE BASE .	107
TABLEAU 13 : PARAMETRES DE SIMULATION (LTE-SIM) .....	110
TABLEAU 14: PARAMETRES DE SIMULATION .....	121

# Liste des acronymes

<b>2G</b>	Second Generation
<b>3G</b>	Third Generations
<b>3GPP</b>	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project
<b>ANR</b>	Automatic Neighbour Relations
<b>AMC</b>	Adaptive Modulation & Coding
<b>BDP</b>	Bandwidth Delay Product
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>CQI</b>	Channel Quality Indicator
<b>CRC</b>	Cyclic Redundancy Check
<b>CMTS</b>	Multipath Transmission Concurrent Scheme
<b>DCF</b>	Distributed Coordination Function
<b>DCH</b>	Dedicated Channel
<b>DRX</b>	Discontinuous Reception
<b>DTX</b>	Discontinuous Transmission
<b>eNodeB</b>	evolved Node B
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core
<b>FACH</b>	Forward Access Channel
<b>GTP</b>	Green Topological Potential
<b>HetNet</b>	Heterogeneous Networks
<b>KPI</b>	Key Performance Indicators
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>LTE-A</b>	Long Term Evolution Advanced
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>MADM</b>	Multi-Attribute Decision Making
<b>MCS</b>	Modulation and Coding Scheme
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output
<b>MMD</b>	Multi-Modes Device
<b>MPTCP</b>	Multipath Transmission Control Protocol
<b>MU-MIMO</b>	Multi-User MIMO
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
<b>PCH</b>	Cell Paging Channel
<b>PRB</b>	Physical Resource Bloc

<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>QoE</b>	Quality of Experience
<b>RNC</b>	Radio Network Controller
<b>RR</b>	Round Robin
<b>RSS</b>	Received Signal Strength
<b>SC-FDMA</b>	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
<b>SCTP</b>	Stream Control Transmission Protocol
<b>SINR</b>	Signal Interference to Noise Ratio
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>SON</b>	Self Organizing Networks
<b>TIC</b>	Technologies de l'Information de des Communications
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>TP</b>	Topological Potential
<b>TTI</b>	Time Transmission Interval
<b>TM</b>	Terminal Mobile
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network





# I. Introduction générale

## I.1 Contexte et motivations

Aujourd'hui, il existe une volonté, presque universelle, pour minimiser l'impact des activités humaines sur l'environnement et pour préserver les ressources naturelles pour les prochaines générations. Une mobilisation générale touche presque tous les secteurs afin d'identifier, d'analyser puis de limiter ou réduire les effets nuisibles sur notre planète.

Le secteur des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) n'est pas épargné de ces réflexions.

L'impact des activités humaines sur l'environnement est mesuré par son empreinte carbone qui s'exprime en équivalent de tonnes de dioxyde de Carbone ( $\text{CO}_{2e}$ ). Pour chaque secteur, il existe des approches spécifiques plus ou moins complexes permettant de mesurer cette empreinte.

En ce qui concerne le secteur des TIC, il est très difficile de trouver des chiffres exacts sur les émissions mondiales de  $\text{CO}_{2e}$ , vu le nombre important de facteurs à considérer. Cependant, étant donné le poids et le rôle de plus en plus important de ce secteur, la valeur de son empreinte est estimée à 2% de l'ensemble des émissions mondiales, soit l'équivalent de 830 millions de tonnes de  $\text{CO}_2$  en 2011. Cette part, aujourd'hui très proche de celle du secteur de l'aéronautique, atteindrait 10% d'ici 2020 [1] [2].

Dans le rapport SMART 2020 [1], on estime que d'ici 2020 les infrastructures et les équipements réseaux seraient elles seules responsables d'environ 20% des émissions de  $\text{CO}_{2e}$  du secteur des TIC. 6% de cette part reviendrait aux terminaux mobiles. Les infrastructures de réseaux mobiles seraient responsables quand à elle de près de la moitié de ces émissions. En 2010, et toujours selon ce même rapport, les réseaux mobiles auraient une part dominante des émissions en  $\text{CO}_{2e}$ , au sein du secteur des télécommunications, avec une part de 51% de l'ensemble des émissions mondiale du secteur des

télécommunications. Les émissions générées par les réseaux mobiles passeraient de 66 Mt de CO<sub>2e</sub> en 2002 à 179 Mt de CO<sub>2e</sub> en 2020 (cf. Figure 1).

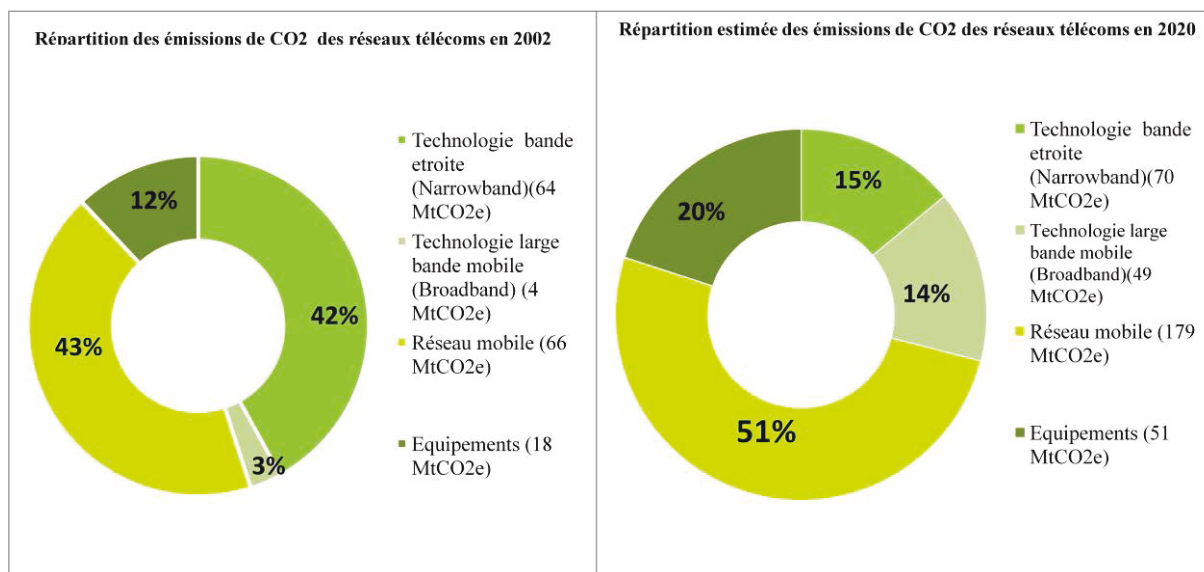


Figure 1: Répartition des émissions en CO<sub>2e</sub> dans le secteur des télécommunications pour 2002 et estimations pour 2020 (traduit de [1])

Si plusieurs facteurs sont considérés dans le calcul de l’empreinte carbone, une part importante de cette dernière est rapportée à la consommation électrique en opération (les autres parts sont relatives aux procédés de fabrication, de transport et de recyclage). En France, et selon une étude du ministère de l’Ecologie, de l’Energie, du Développement durable et de l’Aménagement du Territoire, la consommation électrique des TIC est estimée à 58,5 TWh/an, soit 13.5% de la consommation électrique française, évaluée elle à 434 TWh/an. Cette consommation augmenterait de 10% tout les ans [3].

Ainsi, et suite à cette prise de conscience, l’optimisation et la réduction de la consommation d’énergie dans le secteur des TIC constitue désormais une des priorités du secteur.

Elle est aujourd’hui considérée dans la plupart des appels aux projets nationaux et internationaux. La commission européenne a déjà financé plusieurs projets de recherche portant sur l’efficacité énergétique dans les TIC [4]. Le projet FIT4Green [5] (*Federated IT for a sustainable environmental impact*), commencé en Janvier 2010 a comme objectif la réduction de la consommation d’énergie des centres de données (*datacentre*). Il vise une distribution plus efficace, énergétiquement, des tâches sur les différentes machines, permettant ainsi d’éteindre le maximum d’équipements inutilisés. D’autres projets ayant des objectifs similaires pour les *datacentres* ont été aussi financés par la commission européenne (e.g. [6] [7]).

Concernant les réseaux mobiles, plusieurs projets ont été lancés ayant comme objectif de réduire et d'optimiser la consommation d'énergie sur les différentes strates du réseau. Ainsi, le projet C2POWER [8] (*Cognitive Radio and Cooperative strategies for Power saving in multi-standard wireless devices*), vise à utiliser la radio cognitive et des stratégies de coopération dans les réseaux mobiles hétérogènes afin de réduire la consommation d'énergie sur les terminaux multistandards.

Le projet « EARTH » (*Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies*) a pour objectif de chercher des solutions pour l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les réseaux de communication sans fil, en particulier LTE et LTE-Advanced [9].

## **I.2 Evolution des réseaux sans fil et cellulaires**

Parallèlement à la prise de conscience écologique que nous avons résumée dans la section précédente, le secteur des TIC et en ce qui nous concerne plus particulièrement, le secteur des réseaux sans fil, a connu plusieurs évolutions technologiques et architecturales visant à améliorer la qualité d'expérience de l'utilisateur et à renforcer l'efficacité spectrale sur des ressources radio toujours aussi rare.

### **I.2.1 Evolution technologiques et architecturales**

#### **I.2.1.1 Famille IEEE 802.11x**

L'Institut IEEE (The Institute of Electronic and Electrical Engineers) a publié la norme IEEE 802.11[10] en Juin 1997. La norme définit les couches PHY et MAC des réseaux locaux sans fil (*Wireless Local Area Networks : WLAN*). Plusieurs amendements ont été créés depuis. Ils ont pour but d'améliorer les débits offerts. Les principaux amendements proposés sont :

- IEEE 802.11b [11]: C'est le premier amendement standardisé en 1999. Le débit théorique est de 11 Mbps et la distance d'utilisation peut atteindre les 300 mètres.
- IEEE 802.11a [12]: Une nouvelle technique de modulation appelée *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) a été introduite par cette norme. Elle permet une augmentation des taux de transmission de données dans une plus petite bande passante. Elle permet de passer de la bande de fréquence 2,4 GHz à la bande 5 GHz. Son débit théorique est de 54 Mbps.
- IEEE 802.11g [13]: Cet amendement a tenté de combiner les avantages des deux amendements 802.11a et 802.11b. En effet, il offre un débit théorique allant jusqu'à 54 Mbps et utilise la fréquence de 2,4 GHz pour une plus grande portée.

- IEEE 802.11n [14] : Dans la quête de débit de données toujours plus élevé, 802.11n est la première norme IEEE qui introduit l'utilisation d'antennes multiples de type MIMO (Multiple Input Multiple Output) et du multi flux. De plus, elle exploite les deux bandes de fréquence (2.4 GHz et 5 GHz) et utilise la technique OFDM. Le débit théorique est de 600Mbit/s.

Bien que plusieurs améliorations aient été réalisées dans la couche physique, la couche MAC n'a pas subi beaucoup de changements et les méthodes d'accès DCF (*Distributed Coordination Function*) et PCF (*Point Coordination Function*) basées sur la technique d'accès multiple avec écoute de porteuse et évitement de collision CSMA/CA restent les seuls modes employés par les standards de la famille IEEE 802.11x.

- IEEE 802.11ac [15]: C'est la prochaine évolution de la norme WiFi qui promet de supporter de multiples flux vidéo en Haute Définition (HD) simultanément. Les débits peuvent atteindre des valeurs maximales supérieures à un Gigabit par seconde. Cette norme opère dans la bande des 5 GHz, où il y a relativement moins d'interférence et plus de canaux disponibles par rapport à la bande de 2,4 GHz. Elle est capable d'atteindre des performances supérieures à la norme IEEE 802.11n en utilisant une bande passante plus large, des modulations d'ordre supérieur et des techniques améliorées de gestion de la bande passante. Les liaisons descendantes MIMO multiutilisateurs (MU-MIMO) est une fonctionnalité avancée définie dans cette norme qui permettra d'avoir plusieurs transmissions simultanées dans le sens descendant (du point d'accès (AP) vers quatre stations clientes).

### **1.2.1.2 Famille 3GPP**

L'évolution des réseaux cellulaires de la 3G vers la 4G a pour objectif de répondre à la croissance continue des trafics de données et la multiplication des applications et services qui exigent une meilleure qualité de service. Les réseaux cellulaires de quatrième génération connus aussi sous le nom de LTE-Advanced présentent des similitudes et des différences avec les normes précédentes, en particulier la 3G.

Les principaux apports des réseaux LTE-Advanced sont, en premier lieu, une évolution architecturale au niveau accès et réseau cœur :

- Réseau d'accès E-UTRAN : composé des eNodeB (evolved NodeB), qui ont les mêmes fonctionnalités que les NodeB des réseaux 3G et supportent une partie des fonctions du RNC (Radio Network Controller) qui est lui supprimé.
- Réseau cœur tout IP : Il s'agit du EPC (*Evolved Packet Core*), une infrastructure paquet tout IP qui permet de diminuer le nombre d'équipements ainsi que d'améliorer les performances en termes de QoS et de faciliter les procédures de Handover.

En deuxième lieu, l'utilisation des techniques d'accès OFDMA/SC-FDMA. OFDMA est la technique d'accès utilisée pour la voie descendante dans LTE, cette technique de modulation divise la bande passante disponible en une multitude de sous-porteuses orthogonales. Grâce à cette orthogonalité, le signal transmit évite les interférences des sous-porteuses adjacentes.

En termes d'allocation des ressources SC-FDMA est similaire à OFDMA, mais seules les porteuses contiguës peuvent être attribuées pour le même utilisateur avec SC-FDMA (c.f. Figure 2).

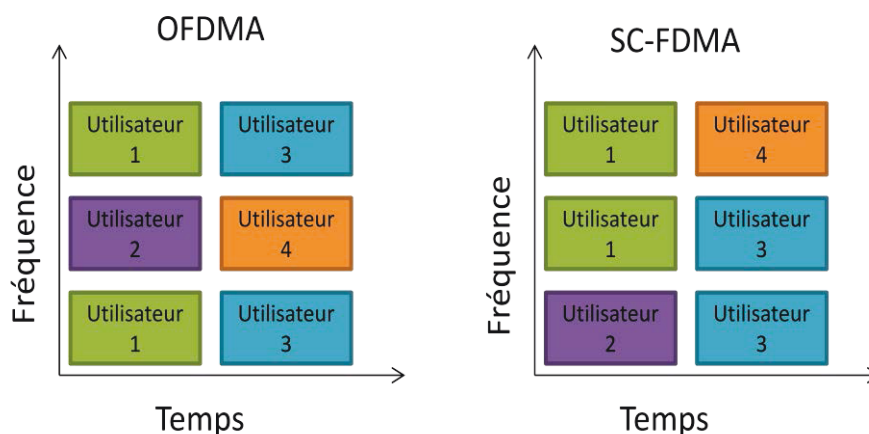


Figure 2: Allocation de ressources OFDMA/SC-FDMA

Comme pour la 3G, la modulation et le codage sont adaptatifs à la qualité du canal AMC (*Adaptive Modulation & Coding*) pour les réseaux LTE-A. L'indicateur de la qualité du canal CQI (*Channel Quality Indicator*) est une mesure de la qualité du canal de communication sans fil envoyé dans le canal de contrôle montant (cf. Tableau 1) :

- Une valeur élevée du CQI indique un canal de haute qualité, la valeur 0 indique que le canal est inutilisable.
- Cet indicateur est calculé en utilisant le rapport signal-sur-bruit (SNR).
- Rapporté à partir des terminaux mobiles aux eNodeB à travers les canaux de contrôle.

CQI	Modulation	Taux de codage	Efficacité spectrale
0	Hors de portée		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758

7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

Tableau 1: CQI [10]

L'utilisation de la technologie multi antennes MIMO (*Multiple Input Multiple OutPut*) (déjà utilisée par la norme 3G) en émission et en réception permet d'augmenter les débits et la portée en multipliant les canaux de communication parallèles.

## I.2.2 Autres évolutions technologiques

### I.2.2.1 Coexistence et environnement hétérogène

Le déploiement de technologies sans fil hétérogènes permet aux utilisateurs ayant des terminaux mobiles multi-interfaces (ou multimodaux) d'exploiter cette diversité pour bénéficier des débits plus élevés et d'améliorer la qualité de service. Dans ce contexte, des points d'accès WiFi par exemple peuvent être résidentiels, publics (hot-spot) ou encore organisés en réseaux communautaires. Il devient alors possible de communiquer à travers un réseau 3G et de basculer toute une session vers un réseau WiFi quand c'est possible (si on passe par une zone couverte WiFi). Il devient également possible d'utiliser simultanément les différentes interfaces du terminal pour différents flux voire même de partager un même flux en sous flux. Cette dernière possibilité nécessitera des évolutions au niveau architectural et de signalisation au niveau des couches basses afin de garantir l'ordonnancement des paquets et leur synchronisation (cas des flux multimédia).

### I.2.2.2 Terminaux multi-modes

Un terminal mobile dit multi-interfaces ou multi-modes est un terminal qui possède plusieurs interfaces radio. Il est donc capable de communiquer à travers des standards technologiques différents. Avec des évolutions protocolaires adéquates, il est possible de gérer sur ce type de terminaux les opérations de handover vertical et de multi-homing.

La sélection de l'interface la plus appropriée à un instant donnée ou pour un flux donné, nécessite des mécanismes de décision multicritères. En effet, le choix du meilleur réseau disponible s'avère plus complexe que le choix du meilleur point d'accès au sein d'une même technologie.

### **1.2.2.3 Protocoles multi-chemin**

De nouvelles solutions protocolaires voient le jour également et permettent d'exploiter au mieux les avantages des environnements réseaux, riches, hétérogènes et dynamiques.

Dans ce qui suit, nous présentons trois exemples de protocoles permettant d'exploiter l'aspect multi-chemin, et facilitant par conséquent le multi-homing : le Stream Control Transmission Protocol (SCTP), le Multipath TCP (MPTCP) et LISP.

#### **- Le protocole SCTP: Stream Control Transmission Protocol**

SCTP [16] est un protocole de transport offrant des fonctionnalités supplémentaires par rapport à TCP. Avec SCTP, un terminal est capable d'exploiter plusieurs adresses IP simultanément. Contrairement à une connexion TCP définie par un couple (Adresse IP, Port TCP), un terminal SCTP offre plusieurs adresses IP et un unique port SCTP (Adresse IP<sub>1</sub>, Adresse IP<sub>2</sub>...Adresse IP<sub>n</sub>, Port SCTP).

#### **- Le protocole MTCP : Multipath TCP**

MPTCP [17] est un standard proposé par l'IETF et qui offre à l'utilisateur la possibilité d'utiliser plusieurs connexions TCP simultanées à travers des interfaces réseaux différentes. L'utilisation simultanée de deux interfaces permet d'augmenter le débit et d'accroître la fiabilité d'une transmission. En effet, lorsque l'un des chemins subit des dégradations au niveau radio ou routage par exemple, la transmission peut continuer sur les autres chemins sans coupure.

#### **- Le protocole LISP; Locator/Identifier Separation Protocol**

Comme son nom l'indique ce protocole de routage, développé par l'IETF, sépare les deux caractéristiques propres aux adresses IP[18], à savoir la localisation et l'identifiant du terminal. En effet, l'adresse IP est composée à la fois de l'identifiant (*Endpoint Identifier : EID*) et du localisateur (*Routing LOCators : RLOC*) d'un équipement donnée. Dans le cadre d'un environnement multi-homé, cette approche est moins adaptée puisque un terminal mobile ayant plusieurs interfaces radio (donc plusieurs identifiants) peut avoir plusieurs adresses IP différentes. Avec la séparation adresse/identifiant, le protocole LISP peut permettre d'optimiser les opérations de routage dans des environnements dynamiques (mobilité) mais aussi en cas de multi-homing.



### I.3 Coexistence, Complexité et concept de réseaux auto-organisés

L'environnement réseaux sans fil actuel est hétérogène. Ceci se manifeste à travers la multitude de technologies et de standards de réseau sans fil disponibles (3GPP, WiFi, Wimax, Bluetooth, Zigbee, etc.), à travers la diversité des terminaux mobiles ayant des caractéristiques et des capacités différentes (interfaces, mémoire, processeurs, etc.) et la multitude des services offerts, avec leurs exigences en termes de QoS et de QoE (débits, latences, délais, ..). Sur cet environnement hétérogène de nouvelles solutions architecturales et protocolaires s'imposent afin de supporter la diversité des services, l'intégration des terminaux mobiles multimodaux, une meilleure gestion de la mobilité et de l'autonomie. Ceci est en ligne avec les objectifs des réseaux futurs qui cherchent à satisfaire la vision 4A : « The 4A Vision : “*Anytime, Anywhere, by Anyone and Anything*” » proposé par l'ITU [19].

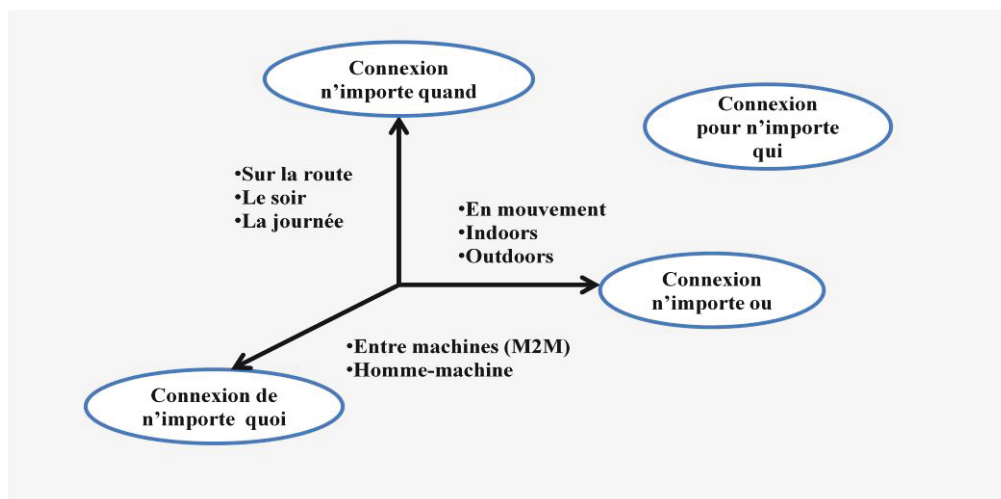


Figure 3: The 4A Vision: “Anytime, anywhere, by anyone and anything”[19].

Ces évolutions ne sont pas évidentes à mettre en place rapidement. En effet, avec la complexité croissante des technologies et les difficultés de coopération et d'interopérabilité, les techniques actuelles quasi-manuelles pour la planification et la gestion des réseaux et des services nécessitent des évolutions architecturales avec l'introduction de mécanismes autonomes pour l'auto-organisation et l'auto-adaptation.

#### I.3.1 Principe et intérêt du concept de réseaux auto-organisant

L'auto-organisation désigne la capacité des entités d'un système donné de s'organiser automatiquement et de maintenir une certaine stabilité sans contrôle extérieur ni entité centralisée. On attend des systèmes auto-organisés non seulement l'interopérabilité et les interactions et échanges entre les entités mais aussi une certaine intelligence dans le comportement et la prise de décision. Le

concept d'auto-organisation, (*Self Organizing Networks : SON*), est généralement divisé en trois sous-domaines: l'auto-configuration, l'auto-optimisation et l'auto-guérison

- **L'auto-configuration** : Cette tâche concerne le déploiement et la configuration automatique des réseaux. Elle comprend, généralement, l'installation du matériel (station de base, point d'accès, routeurs etc.) et la configuration des interfaces de transport entre les nouveaux nœuds et les nœuds existant dans le réseau.
- **L'auto-optimisation** : Cette tâche concerne l'optimisation automatique des réseaux et des entités de réseaux. Le besoin de l'auto-optimisation provient du fait de la dynamique et de la complexité croissante des réseaux en termes de technologies, de procédures et de protocoles. Avec la mobilité par exemple, l'optimisation des transmissions passent par des adaptations continues de différentes procédures et paramétrages touchant les couches physique (PHY) et lien (LINK). Il est difficile dans ce cas d'intervenir manuellement, d'autant que ces optimisations peuvent affecter d'autres aspects liées par exemple au routage ou à l'adaptation des services (e.g. codage).
- **L'auto-maintenance/dépannage** : Ces tâches concernent les opérations de dépannage et de maintenance, basées sur des mesures effectuées à différents niveaux et sur différentes entités du réseau. L'objectif étant d'automatiser la détection et les opérations de maintenance qui deviennent de plus en plus compliquées à résoudre manuellement dans des temps acceptables.

Le concept d'auto-organisation a été adopté historiquement par les réseaux de capteurs WSN (*Wireless Sensor Networks*) et les réseaux Ad hoc.

En effet, les réseaux de capteurs sont caractérisés par l'utilisation d'un très grand nombre de nœuds inaccessibles et qui peuvent être actifs de façon intermittente. La gestion manuelle des réseaux de capteurs est quasi impossible vu le nombre de capteurs pouvant être déployés avec une architecture distribuée. L'objectif de l'auto-organisation est alors de permettre aux réseaux de capteurs de s'adapter dynamiquement et de façon autonome à l'évolution de leur environnement (souvent avec une visibilité limitée aux quelques voisins proches).

Parmi les procédures pouvant bénéficier du concept d'auto-organisation, nous pouvons citer par exemple :

- La détermination de la topologie du réseau par l'étude du voisinage
- La détermination des clusters de capteurs (par fonction ou par voisinage)
- L'organisation de l'accès au canal entre voisins
- Le routage de proche en proche et les techniques de relaying

Notons que vu les limitations des ressources des capteurs, l'efficacité énergétique est un des sujets les plus traités dans la littérature. La quasi-totalité des procédures citées plus-haut considèrent

l'optimisation de la consommation d'énergie sur les capteurs comme un des paramètres les plus prioritaires.

Le concept d'auto-organisation a été récemment adopté dans le cadre des réseaux cellulaires de prochaine génération.

### **I.3.2 Réseaux LTE auto-organisés**

Les Self Organizing network (SON) [20] sont les réseaux qui s'auto-organisent, s'auto-optimisent et s'auto-configurent. Certaines tâches telles que la planification de réseaux, la configuration et l'optimisation de certains paramètres, ont un coût cher pour l'opérateur et sont souvent source d'erreur. Leurs automatisations via l'utilisation des fonctions SON peut aider l'opérateur à réduire ses coûts.

L'architecture SON proposée par le groupe 3GPP peut être centralisée, distribuée ou hybride. Elle propose des fonctions spécifiques pour les trois aspects suivants.

#### **a- Fonctions pour l'auto-optimisation :**

Elles touchent les aspects suivants :

- La capacité : La fonction MLB (*Mobility Load Balancing*) concerne les stations de base qui souffrent d'une congestion. Ils peuvent donc céder une partie de leurs charges à des stations voisines qui ont plus de ressources disponibles. Cette solution introduit un échange de la charge du réseau et la disponibilité en termes de ressources entre les stations de base. Cet échange peut se faire périodiquement, toute les 1 à 10 seconde et peut contenir des informations sur l'état des ressources radio pour le *Uplink* et le *Downlink* séparément. Le pourcentage des ressources radio alloués (PRB) et le pourcentage des ressources radio disponibles sont ainsi échangés.
- Le handover : La fonction MRO (*Mobility Robustness Optimization*) est une solution pour la détection automatique et la correction des erreurs liées à la mobilité. Le handover en retard ou en avance et le handover vers la mauvaise cellule, sont trois aspects contrôlés et corrigés par cette solution.
- L'interférence : L'objectif ici est de minimiser les tentatives qui causent de l'interférence dans le canal RACH (*Random Access CHannel*). Le terminal mobile peut être interrogé par l'eNodeB pour les statistiques RACH après la connexion.

#### **b- Fonctions pour L'auto-configuration**

L'auto-configuration des réseaux SON est composée essentiellement de trois mécanismes.

- La gestion des relations de voisinage : Dans le but de réduire le travail manuel, la fonction d'établissement automatique des relations de voisinages (*Automatic Neighbour Relations*, ANR) est utilisée [21]. L'ANR est une fonction qui gère la table de voisinage NRT (*Neighbour Relation Table*) et qui contient la fonction *Neighbour Detection Function*. L'ANR est utilisée pour minimiser le travail requis pour la configuration d'un nouveau eNodeB et optimise la configuration durant le déploiement du réseau. La correction et la mise à jour de la liste de voisinage augmentent la probabilité des handover réussis et minimisent le nombre de coupure d'appels. L'ANR contient également la fonction *Neighbour Removal Function* qui supprime les relations de voisinage périmées [22] d'une manière automatique. Ceci minimise le besoin de planification et de configuration des NR (Neighbour Relations).
- L'auto-configuration du PCI : L'eNodeB va lui-même configurer l'identifiant de la cellule (*Physical Cell Identity : PCI*), ainsi que la fréquence et la puissance de transmission. Assurant ainsi une planification plus rapide et plus autonome s'adaptant dynamiquement à l'environnement radio et au voisinage.
- L'auto-configuration des interfaces : Les interfaces S1 (définie entre le eNodeB et le cœur du réseau : EPC) et X2 (définie entre les eNodeBs voisins afin gérer le handover des utilisateurs) sont dynamiquement configurées ainsi que les adresses IP.

### c- Fonctions pour l'auto dépannage « Self-Healing »

Lorsque certains nœuds du réseau deviennent inopérants, les mécanismes d'auto-dépannage visent à réduire les impacts de l'échec, par exemple en ajustant les paramètres et les algorithmes dans des cellules adjacentes afin qu'ils peuvent soutenir les utilisateurs qui ont été pris en charge par le nœud défaillant. Du point de vue de la gestion des défauts, pour chaque anomalie détectée, des alarmes appropriées doivent être générées par l'entité du réseau défectueux.

Lorsqu'une alarme est déclenchée, des informations sont recueillies (e.g. les mesures, le résultat d'essai, etc.) et l'analyse de ces informations est effectuée. En fonction des résultats de cette analyse, des mesures de redressement sont déclenchées en cas de besoin. La collecte des informations est améliorée et simplifiée grâce à la fonction de minimisation des « drive tests » MDT (*Minimization of Drive Tests*). Cette fonctionnalité permet à des utilisateurs normaux de fournir le même type d'informations que celles recueillies dans le « drive test ». Un grand avantage est que les utilisateurs peuvent récupérer et rapporter les paramètres des milieux intérieurs (indoor).

## I.3.3 Vers les réseaux 5G

L'intelligence et la capacité d'auto-adaptation seront les clés de la prochaine génération des réseaux sans fil dite génération 5G. L'intelligence joue un rôle important dans la gestion, l'adaptation et l'optimisation des réseaux :

- L'intelligence pour la gestion des réseaux hétérogènes : Il faut considérer non seulement l'hétérogénéité des technologies radio mais aussi l'hétérogénéité des nœuds au sein d'une même technologie (e.g. LTE HetNets) avec des cellules de différentes tailles adaptées à des cas d'usage ou des situations différentes. Il faut également considérer le contexte complexe qui englobe la mobilité des utilisateurs et probablement des points d'accès eux-mêmes. L'intelligence sera nécessaire afin de s'adapter et d'optimiser le service rendu à l'utilisateur en adaptant à la volé les topologies et les accès au réseau.

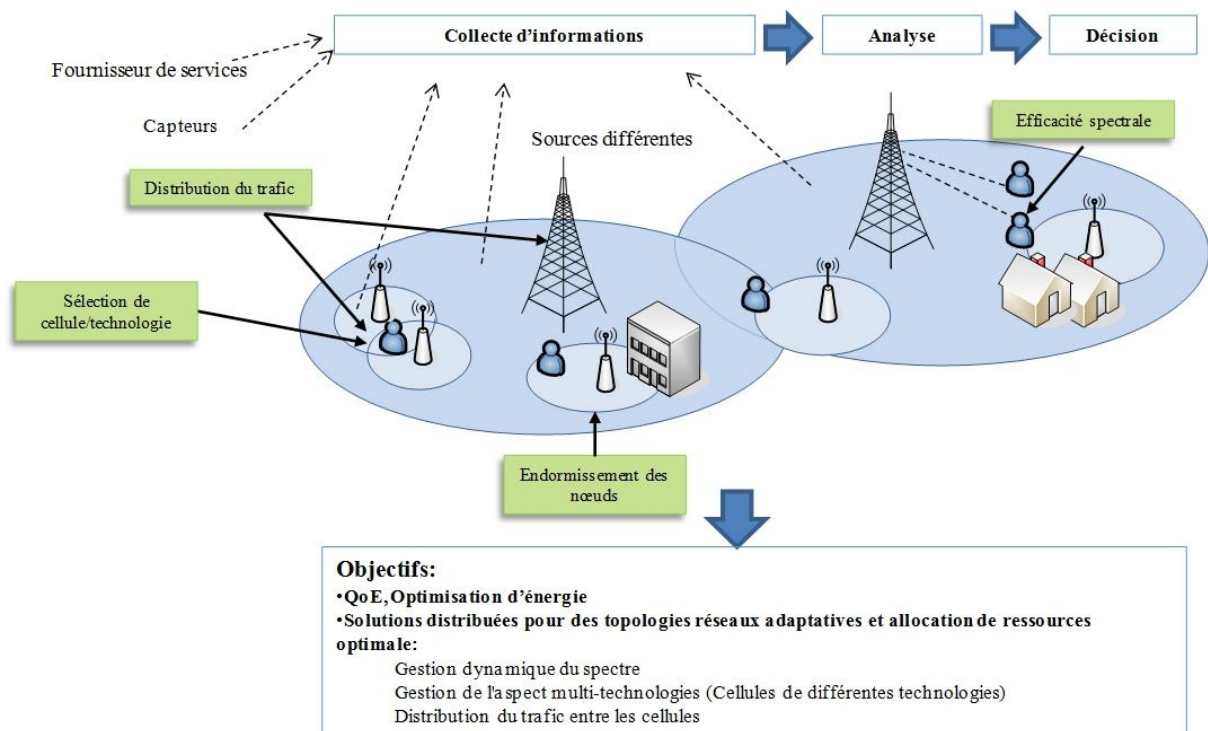


Figure 4: Exemple d'optimisation au sein des réseaux hétérogènes

- Collecte, gestion et partage des connaissances : Le premier défi dans ce contexte est la collecte des informations depuis des sources différentes (utilisateurs, terminaux mobiles, entités de réseaux et de services). Des sources externes peuvent également être utiles telles que les prévisions météo ou de trafic routier. Ces informations sont de natures et de types différents. Nous pouvons distinguer entre les informations statiques et dynamiques. Les premières peuvent concerner par exemple les préférences des utilisateurs, les caractéristiques des terminaux mobiles et des technologies réseaux. Les secondes, dynamiques, peuvent concerner la localisation des utilisateurs, le niveau de batterie de son terminal, la charge des réseaux disponibles ainsi que les caractéristiques temps réel du canal. L'ensemble de ces informations peut servir à la prise de décision concernant plusieurs problématiques telles que la gestion de la mobilité, l'adaptation de services et l'optimisation de la consommation d'énergie. Les

entités de décision doivent donc avoir accès à ces informations ce qui nécessite des techniques de collecte et de gestion de données efficaces et peu gourmandes en ressources.

Alors que la 3G est considérée centrée opérateur et que la 4G est considérée centrée services, la 5G peut être considérée centrée utilisateur (user centric).

Elle sera déployée dans quelques années (d'ici 2020 pour l'UE et dès 2018 dans certains pays tel que la Corée du sud).

Avec des architectures HetNet, les terminaux mobiles 5G doivent être capables de se connecter simultanément aux différents réseaux sans fil disponibles et d'en faire partie intégrante en agissant probablement comme relai à leurs pairs [23].

Le défi principal de la 5G est d'améliorer la QoS/QoE des utilisateurs en utilisant efficacement les ressources disponibles (de stockage, de communication...) et en garantissant la continuité des services via plus de coopération et d'interopérabilité.

L'optimisation de la consommation d'énergie fait partie de l'amélioration de la QoE des utilisateurs. Garantir une utilisation optimale de l'énergie disponible en quantité limitée sur les terminaux mobiles reste un défi non négligeable dans l'évolution des réseaux.

## **I.4 Organisation et contributions de la thèse**

Durant cette introduction nous avons évoqué l'évolution protocolaire et architecturale des réseaux sans fil en particulier les réseaux auto-organisés. Nous avons aussi présenté le contexte hétérogène des réseaux de télécommunication actuels.

La suite de ce manuscrit est organisée en six chapitres.

Le chapitre 2 est consacré à l'analyse de l'état de l'art de la conservation d'énergie dans les réseaux sans fil et en particulier les réseaux d'accès. Nous présentons d'une part les différents modèles énergétiques proposés dans la littérature, et d'autre part une synthèse des techniques de conservation d'énergie existantes.

Dans le chapitre 3, nous nous intéressons à la problématique de sélection d'interfaces dans les réseaux d'accès hétérogènes. Nous présentons un nouvel algorithme d'ordonnancement des paquets pour les liaisons montantes permettant de minimiser la consommation de l'énergie de transmission pour les terminaux mobiles tout en considérant la mobilité des utilisateurs et les conditions de canal.

Le chapitre 4 est consacré à la problématique globale de gestion d'interfaces sur les terminaux mobiles multimodaux. Nous analysons en premier lieu les modèles énergétiques existants et nous en tirons les règles concernant la consommation d'énergie des différentes interfaces. Ensuite, nous intégrons ces

règles au sein d'une plateforme de gestion d'interfaces, permettant d'améliorer la consommation d'énergie des terminaux mobiles.

Dans le chapitre 5 nous nous focalisons sur l'optimisation de la consommation d'énergie des réseaux d'accès LTE hétérogènes auto-organisés. Nous proposons une solution distribuée d'association dynamique des utilisateurs basée sur un compromis énergie-QoS. L'efficacité énergétique est exprimée en termes de quantité de puissance consommée par utilisateur et la QoS est exprimée en termes d'efficacité spectrale. Nous proposons ensuite, une évaluation des performances énergétiques de quelques algorithmes d'ordonnancement existants en utilisant différentes métriques d'efficacité énergétique.

Enfin nous tirons les conclusions de ce travail et nous discutons des perspectives futures et des axes de recherche possibles.

## **I.5 Publications de l'auteur**

GHARIANI, Takoua, et JOUABER, Badii. *User Association for Power-Spectral Efficiency Trade-off in Green LTE HetNets*, accepté à: The 20th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2014), Thailand, October 2014.

GHARIANI, Takoua, et JOUABER, Badii. *Energy Aware Cross Layer Uplink Scheduling for Multihomed Environments*. The 5th IEEE International Workshop on Management of Emerging Networks and Services (IEEE MENS 2013), IEEE GLOBECOM, Atlanta, Georgia, USA. p. 861-866.

GHARIANI, Takoua, et JOUABER, Badii. *ECO-WISM: Energy Consumption Optimization for Wireless Interface Selection Mechanism*. International Conference on Networking and Future Internet (ICNFI 2012), Istanbul 2012.

LOUKIL, Mehdi, ZEKRI, Mariem, GHARIANI, Takoua, et al. *A Reputation based Vertical Handover Decision making Framework (R-VHDF)*. The 7th IEEE International Workshop on Heterogeneous, Multi-Hop, Wireless and Mobile Networks (HeterWMN), IEEE GLOBECOM, Anaheim, CA, USA 2012.p.464-469.

## II. Etat de l'art

### II.1 Introduction

Jusqu'à récemment, l'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux sans fil était considérée comme un besoin critique, imposé par la contrainte physique qu'est la durée de vie des batteries des équipements embarqués tels que les téléphones portables et les capteurs. En effet, les travaux dédiés à la réduction de la consommation d'énergie dans les réseaux sans fil sont apparus pour répondre à une problématique cruciale liée à la limitation de ressources dans les réseaux de capteurs. Les réseaux de capteurs sont caractérisés par de faibles capacités de calcul, de mémoire et surtout d'énergie. Cette limitation de la capacité énergétique est d'avantage problématique à cause des cas d'utilisation de ce type de réseau vu que le déploiement des nœuds est généralement effectué dans des milieux hostiles et peu accessibles tels que des terrains accidentés, des champs de batailles, etc. Ceci impacte directement la durée de vie de ce type de réseaux et fait de la consommation d'énergie un critère prépondérant dans la conception et l'utilisation des réseaux de capteurs.

Aujourd'hui, la problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux sans fil est présente à différents niveaux. De nouvelles contraintes sont de plus en plus considérées. Parmi elles, nous pouvons citer la minimisation des interférences pour améliorer la QoS, du niveau de rayonnement pour limiter l'impact sur la santé et la réduction de la consommation d'énergie pour réduire les coûts et pour minimiser l'empreinte Carbonne.

Tous les acteurs de ce secteur, y compris les autorités de régulation, les gouvernements, les organismes de standardisation, les industriels, les opérateurs et les utilisateurs finaux sont de plus en plus sensibles à l'effet de leurs activités sur la planète.

Dans la littérature, différentes approches d'optimisation touchant plusieurs aspects liés à la consommation d'énergie dans les réseaux sont proposées (Figure 5). Elles concernent les aspects technologiques, architecturaux et de gestion des réseaux. En effet, concernant les terminaux mobiles, la conservation d'énergie peut être réalisée à travers :

- La sélection/gestion des interfaces
- L'ordonnancement des paquets/flux



- Le contrôle de puissance

Parmi les aspects qui font l'objet des travaux minimisant la consommation d'énergie des réseaux d'accès, nous pouvons citer :

- Endormissement
- Planification et dimensionnement
- Ordonnancement
- Association des utilisateurs

Plusieurs protocoles de routage optimisant la consommation énergétique ont été proposés dans le cadre de la conservation d'énergie au niveau du cœur du réseau.

En ce qui concerne les centres de données, plusieurs approches ont été proposées afin d'atténuer et optimiser la consommation énergétique des serveurs :

- La virtualisation
- L'optimisation de l'utilisation des serveurs

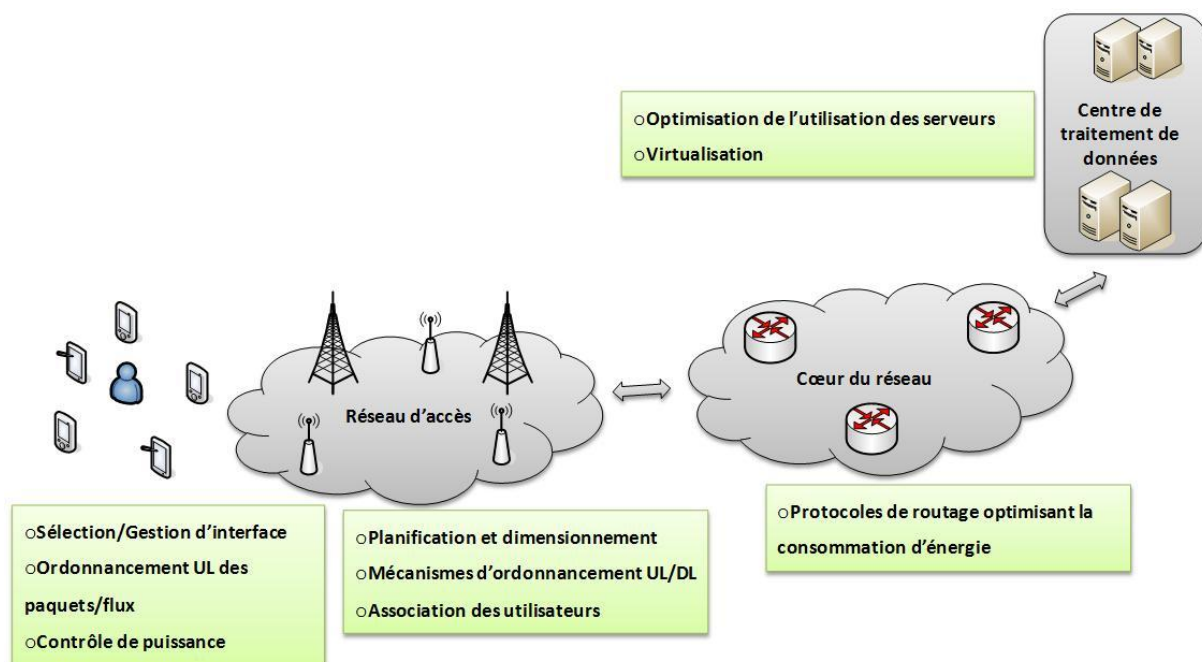


Figure 5: Approches de conservation d'énergie dans les réseaux sans fil

Dans cette thèse on s'intéresse aux travaux liés à la conservation d'énergie pour les terminaux mobiles et pour les réseaux d'accès. Ainsi, dans ce chapitre nous introduisons, dans un premier temps la conservation de l'énergie pour les terminaux mobiles. Dans un second lieu nous présentons la

conservation d'énergie pour les réseaux d'accès sans fil. Pour ces deux axes de recherche, nous décrivons quelques modèles de consommation d'énergie existants pour les différentes technologies radio et nous présenterons un panorama des différentes solutions de réduction d'énergie.

## II.2 Conservation d'énergie sur les terminaux mobiles

L'une des limitations des terminaux mobiles réside dans le fait que la capacité des batteries embarquées est faible, ce qui a comme conséquence de réduire la durée de son utilisation entre deux recharges. Malgré que les technologies des batteries évoluent, cette limitation est accentuée par l'évolution rapide des usages en mobilité en termes de nombre d'applications et de volumes de données.

Les standards qui définissent les réseaux et technologies radio, tels que ceux de l'IEEE et du 3GPP ont très tôt considéré la problématique de conservation de l'énergie sur les terminaux mobiles en introduisant la notion d'états pour les interfaces radio, selon l'activité du mobile.

Dans la littérature, plusieurs travaux ont été consacrés à l'évaluation de la consommation d'énergie sur les terminaux mobiles. Mais avant d'aborder ces études, nous rappelons dans la section suivante les différents états des interfaces radio tels que définis par les standards.

### II.2.1 Etats des Interfaces Radio selon les standards

Nous considérons dans cette section les états des interfaces radio de trois technologies radio que nous allons analyser et étudier dans les contributions présentées dans les chapitres suivants. Nous avons choisi la technologie WiFi opérant plutôt en mode décentralisé ainsi que les technologies 3G et LTE opérant en mode centralisé.

#### Cas des Interfaces WiFi

Ainsi, le fonctionnement d'une interface WiFi est régi par une machine à état définie par les trois états suivant :

- **Etat Veille « Idle »** : Dans cet état le terminal mobile peut être soit dans un état d'inactivité (il n'a pas des données à transmettre ou à recevoir) ou bien à l'écoute du canal.
- **Etat Sommeil « Sleep »** : Le terminale est en état d'inactivité et n'est plus à l'écoute du canal
- **Etat Actif (Emission/ Réception)** : Dans cet état, le terminal mobile, déjà connecté au point d'accès est autorisé à utiliser le canal pour envoyer et recevoir les données selon la méthode d'accès liée à la technologie (technique CSMA/CA).

Les transitions entre ces états dépendent des besoins des couches hautes en termes de transmission et de réception de paquets. En cas d'activation, l'interface passe par deux phases successives de

découverte de l'environnement radio (réseaux disponibles) et de connexion lui permettant de s'associer à un réseau lui permettant enfin de pouvoir transmettre des données.

- Phase de Découverte (scanning) : Dans cet état, l'interface WiFi découvre son environnement radio pour détecter et identifier les points d'accès à proximité pouvant éventuellement être utilisés.
- Phase de connexion : C'est la phase pendant laquelle les opérations d'authentification et d'association avec un des points d'accès disponible sont effectuées.

### **Cas des Interfaces 3G**

Contrairement aux réseaux WiFi, les réseaux cellulaires opèrent en mode centralisé avec des mécanismes de demande et d'allocation de ressources contrôlés par le réseau. Pour les interfaces radio de type 3G, les standards du 3GPP définissent deux états : Connecté et Veille. Pour le premier, trois modes définissent le type de fonctionnement du mobile, à savoir les modes PCH, DCH, FACH. Quand à l'état Veille, il définit un seul mode : Idle[24]:

- **Mode PCH** : Dans cet état, le terminal est connecté mais n'est pas en mesure d'envoyer ou de recevoir des paquets vu qu'aucun canal ne lui est alloué de manière spécifique. Le terminal reste à l'écoute des messages de pagination permettant de le notifier en cas d'appel entrant. Dans ce mode, la consommation d'énergie est la plus faible en comparaison avec les autres modes de l'état connecté.
- **Mode FACH** : Dans cet état, le terminal est connecté mais partage un canal commun avec les autres terminaux. Cet état est utilisé quand il le terminal a peu de trafic à transmettre. La consommation de l'énergie est inférieure à celle consommée à l'état DCH.
- **Mode DCH** : Dans cet état, le terminal est connecté et un canal dédié lui est alloué. Le terminal peut demander et utiliser des ressources dédiées pour ses transmissions tout en gardant la possibilité d'utiliser des ressources partagées (pour des transmissions de faible volume).
- **Etat IDLE** : Dans cet état, l'interface radio du terminal mobile est inactive et n'a pas la possibilité de transmettre des données. La consommation d'énergie dans cet état étant la plus faible.

### **Cas des Interfaces LTE**

Concernant la technologie LTE, seul deux états sont définis [25] mais introduit le mode DRX permettant de réduire la consommation énergétique:

- **Etat RRC\_CONNECTED** : Dans ce mode, le terminal est connecté au réseau et donc capable de recevoir et de transmettre des données. Afin de réduire la consommation d'énergie, la norme 3GPP définit la notion des cycles DRX (mode de réception discontinue) et DTX (mode de transmission discontinu). Ces deux cycles permettent de basculer l'interface radio en mode inactif tout en gardant le contrôle sur la mobilité de l'utilisateur.
- **RRC\_IDLE** : Similaire à l'état IDLE pour la 3G, cet état correspond à l'état d'un terminal mobile inactif et à l'écoute de son environnement radio

## II.2.2 Modèles énergétiques

Dans cette section, nous allons présenter les principaux modèles de consommation d'énergie dédiés aux interfaces radio des terminaux mobiles proposés dans la littérature.

### II.2.2.1 Modèles énergétiques pour la famille IEEE 802.11x

Bien que la technologie des réseaux de la famille IEEE 802.11 ait évolué, au niveau de la couche PHY, le mode de fonctionnement au niveau MAC est resté basé sur la technique d'accès CSMA/CA. Plusieurs travaux ont proposé des modèles de consommation d'énergie pour les terminaux de la norme IEEE 802.11x. On peut regrouper ces modèles sous deux catégories complémentaires, les modèles analytiques et les modèles basés sur des mesures.

- **Modèles analytiques**

Dans [26], Rajan et Poellabauer ont étudié l'impact de la taille de paquet sur la consommation d'énergie et ont proposé un modèle analytique. Ils ont modélisé l'énergie consommée pour les paquets transmis avec succès. Leur but est de déterminer une taille de fragment optimal compte tenu du coût de l'énergie basée sur des conditions de canal. L'énergie consommée lors de la transmission d'un paquet avec succès est définie par :

$$E = (n \cdot a \cdot E_{Frame}) + E_{overhead}$$

Où :

- $E_{Frame}$  est l'énergie consommée pour transmettre une trame et exprimée par :

$$E_{Frame} = W * \frac{k + h}{R}$$

Où (k+h) représente la taille de la trame (k est la taille en octets du segment et h est la taille en octets de l'entête) et R est le débit.

- a est nombre moyen des tentatives nécessaires pour transmettre avec succès la trame de données et exprimé par :

$$a = \frac{1}{(1 - BER)^{k+h}}$$

Où BER est le taux d'erreur binaire.

- $n$  est le nombre de segment et exprimé par :

$$n = \frac{b}{k}$$

Où  $b$  est la taille en octets du paquet.

- $W$  est la puissance moyenne de transmission du terminal mobile.

Un autre modèle analytique [27] s'intéresse à la consommation d'énergie pour le mécanisme d'accès au canal DCF pour les interfaces 802.11n (Figure 6). Le modèle est composé de six éléments énergétiques : l'énergie de veille qui elle est composée de l'énergie d'écoute du canal PIFS, SIFS et Backoff, l'énergie de transmission de données, de réception d'acquittement, de collision. La consommation d'énergie est exprimée en fonction du nombre de stations actives sur le canal.

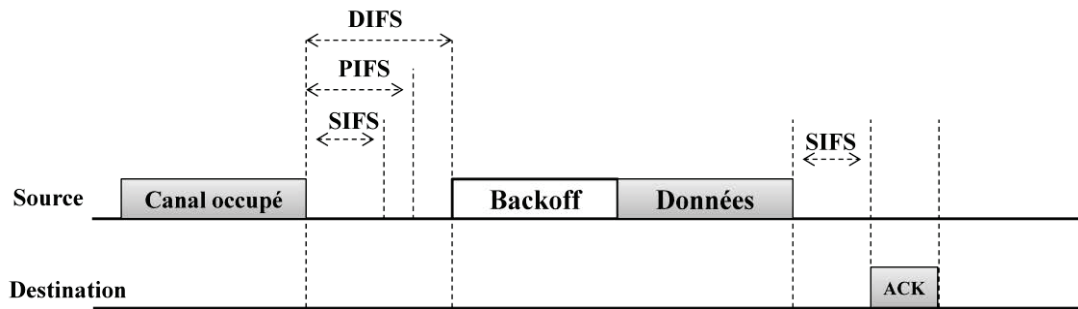


Figure 6: Transmission d'un paquet avec le mécanisme DCF

Basés sur le modèle Bianchi [28], ils ont modélisé dans l'état d'activité, l'énergie de transmission, de réception de données et de collision et pour l'état d'inactivité (écoute du canal), le temps du backoff et les durées minimales de silence entre les trames (DIFS, SIFS). Ainsi l'énergie totale est exprimée par :

$$E = E_{DIFS} + E_{SIFS} + E_{Backoff} + E_{Collision} + E_{Trans} + E_{Recep}$$

Les valeurs de l'énergie consommée pendant les périodes DIFS et SIFS sont exprimées comme suit :

$$E_{DIFS} = P_{IDLE} \cdot \frac{M}{P_s} \cdot DIFS$$

$$E_{SIFS} = P_{IDLE} \cdot SIFS$$

Où  $P_{IDLE}$  est la puissance moyenne consommée dans l'état veille,  $M$  est le nombre de stations actives sur le canal,  $P_s$  est la probabilité qu'une transmission se produise avec succès sur le canal, DIFS est la durée de DIFS (34 $\mu$ s pour la norme 802.11n) et SIFS est la durée de l'inter trame SIFS (9 $\mu$ s pour 802.11n).

Durant la phase du Backoff, la consommation d'énergie d'un terminal mobil est estimée en :

$$E_{Backoff} = P_{IDLE} \cdot CW_{min} \cdot \left( \frac{(1-p) \cdot (1-(2p)^m)}{(1-2p)} + (2p)^m \right)$$

Avec  $p$ ,  $m$  et  $CW_{min}$  sont respectivement la probabilité de collision, et la valeur minimale de la fenêtre de contention. En cas d'activité, trois estimations de la consommation d'énergie des terminaux mobiles sont proposées incluant l'énergie de collision, de transmission et de réception. L'énergie de collision dépend de la probabilité de collision qui dépend-elle du nombre de stations sur le canal :

$$E_{Collision} = P_{Trans} \cdot (\Phi + [(8E(P)/R)/S_t] \cdot S_t) \cdot P_s \cdot (1 - P_s) \cdot N$$

Où  $\Phi$  est l'overhead,  $R$  est le débit,  $S_t$  est la durée d'un symbole OFDM,  $N$  est le nombre de stations ayant une collision et  $E(P)$  est la taille moyenne utile du paquet.

L'énergie de transmission est décrite comme suit :

$$E_{Trans} = P_{Trans} \cdot \left( \frac{1}{1-e} \right) \cdot (\Phi + [8E(P)/R / S_t] \cdot S_t)$$

Où  $e$  est la probabilité d'erreur de la transmission d'un paquet.

Enfin, l'énergie consommée pendant la réception de l'ACK est exprimé par :

$$E_{RECV} = \varphi + \left( \frac{\lceil \frac{112}{R_{BASIC}} \rceil}{S_t} \right) \cdot S_t$$

Où  $R_{BSIC}$  est le débit de donnée de la trame d'ACK.

- **Modèles basés sur des mesures**

Dans [29], les auteurs présentent plusieurs mesures pour l'interface 802.11a dans les différents états de fonctionnement à savoir le mode en veille, transmission et réception des données. Ces mesures sont obtenues en utilisant un oscilloscope. Dans ce travail, la consommation d'énergie par paquet est exprimée en utilisant un modèle linéaire donnée par:

$$E_p = a \cdot x + b$$

$x$ ,  $a$  et  $b$  correspondent respectivement à la taille du paquet, la valeur des coefficients linéaires et une constante déterminée expérimentalement pour les différents modes de fonctionnement (veille, transmission et réception).

Des mesures évaluant l'aspect énergétique de l'interface 802.11g de plusieurs Smartphones (Nokia N810, HTC G1, Nokia N95) ont été réalisées par [30]. Les mesures de la consommation de puissance incluent les états : veille, « sleep », transmission et réception de données. Le tableau suivant présente la puissance mesurée des différents Smartphones :

Etats des interfaces	Nokia N810	HTC G1	Nokia N95
« Sleep »	42	68	88
Veille	884	650	1038
Transmission	1258	1097	1687
Réception	1181	900	1585

Tableau 2: Puissance (mW) des différents états des interfaces WLAN

Basés sur ces mesures, les auteurs ont proposé un modèle énergétique pour les flux de données en considérant les deux sens de communication à savoir émission et réception de données :

$$E = P \cdot T_B + P_I \cdot T_{timeout} + P_S \cdot T_{sleep}$$

Avec  $P_R$ ,  $T_B$ ,  $P_I$ ,  $P_S$ ,  $T_{timeout}$ ,  $T_{sleep}$  sont respectivement la puissance de réception ou transmission de données, la durée du « burst » de paquets, la puissance du mode en veille, la puissance du mode « sleep », la durée pendant laquelle le terminal mobile est dans le mode « sleep ».  $T_B$  et  $S_B$  sont considérés comme les caractéristiques d'un flux donné.

Dans [31], les auteurs ont analysé les interfaces de la norme IEEE 802.11n en effectuant un large nombre d'expérimentations. Chaque expérience vise à évaluer l'impact d'un paramètre, tels que la puissance de transmission, la modulation et le codage, sur la consommation d'énergie des nœuds. Le « testbed » utilisé pour les mesures de consommation d'énergie a été composé de deux nœuds placés à proximité l'un de l'autre afin d'avoir une bonne qualité et qui a permis aux auteurs d'exploiter efficacement toutes les possibilités de modulation et de codage relatives à la norme 802.11n.

Un travail similaire a été réalisé par [32]. Les auteurs ont mesuré la consommation d'énergie de l'interface 802.11n d'un Smartphone Google Nexus S. Ils ont mesuré la quantité de puissance et d'énergie consommée sous différentes conditions vu qu'ils font varier la taille des trames, et les conditions de canal. Les conclusions à tirer de leurs travail est que sous des canaux sans perte, les débits les plus élevés et les trames de grandes tailles sont toujours plus économes en énergie ce qui n'est pas forcément le cas lorsque le taux de perte de paquets est important.

### II.2.2.2 Modèles énergétiques pour les normes 3GPP

Dans la littérature, plusieurs travaux ont étudiés la consommation d'énergie dans les réseaux cellulaires. Dans [33], les auteurs proposent une analyse de la consommation d'énergie pour la 3G. Deux types de trafic sont considérés: navigation Web et vidéo streaming. Le trafic de navigation Web est modélisé comme des sessions de navigation, chacune d'elle est composée de paquets d'appels séparés par des intervalles de lecture. Les différentes sessions de navigation sont séparées par un temps d'intersession. Le trafic vidéo streaming est modélisé comme des sessions de vidéo séparées par des périodes d'inactivité.

L.Wang et al [34] ont analysé les mesures de la consommation d'énergie des interfaces radio 3G des terminaux mobiles. En se basant sur ces analyses, ils ont proposé un modèle de puissance de transmission de données (DCH) à débit binaire constant pour l'interface 3G. La puissance consommée en mode DCH est définie par :

$$P = P_{DCH} + P_{peak} + P_{enc}(s)$$

Où

- $P_{DCH}$  est la puissance minimale consommée pour rester à l'état DCH, qui comprend la consommation de puissance de réception des signaux de contrôle et qui est considérée comme une valeur approximativement constante.
- $P_{enc}$  est la consommation de puissance pour encapsuler ou décapsuler les paquets et qui varie en fonction de la taille du paquet  $s$ , exprimée en octets. Les auteurs ont considéré que cette valeur est négligeable par rapport à la puissance de transmission.
- $P_{peak}$  est la puissance d'émission et de réception des paquets et définie par :

$$P_{peak} = \frac{N}{I} \cdot E_{peak}, \quad \text{si } I > N \cdot \tau$$

- Avec  $N$  est le nombre de blocs de ressources nécessaires pour envoyer un paquet et défini par  $N = \left\lceil \frac{s}{MTBS} \right\rceil$ , où MTBS est la taille maximale d'un bloc de ressource.
- $I$  est l'intervalle d'envoi du paquet, il est généralement plus large que le temps nécessaire pour envoyer un paquet
- $\tau$  est la durée en ms du TTI.
- $E_{peak}$  est définie comme étant la consommation d'énergie de l'envoi ou de la réception d'un paquet et est exprimée en Joules.



Une autre étude proposée dans [35], où les auteurs ont présenté les mesures de consommation de puissance d'un Smartphone utilisant l'interface 3G. Les consommations de puissance des différents états de l'interface 3G (FACH, DCH, IDLE) ont été mesurées. Leurs résultats sont reportés sur le Tableau 4.

### II.2.2.3 Etudes comparatives

Dans la littérature, plusieurs travaux ont été consacrés à des évaluations comparatives de la consommation d'énergies des différentes interfaces radio des terminaux mobiles.

Dans [36], les auteurs présentent une analyse comparative basée sur des expériences de la consommation d'énergie des interfaces WLAN et 3G. Cette expérience consiste à télécharger (download) et charger (upload) des données à travers un point d'accès WiFi et un réseau 3G en variant le taux de charge et la qualité de la liaison radio. En mesurant le pourcentage de niveau de charge restant au cours du temps, ils ont constaté que la consommation d'énergie augmente de 18,3% si les deux interfaces sont activées en comparaison avec le cas dans lequel seule l'interface 3G est activée. En ce qui concerne les communications de données, les deux interfaces consomment la même quantité d'énergie au cours du temps, mais une grande différence est constatée lorsqu'on considère l'énergie consommée par unité de données (Mo). En utilisant seulement l'interface 3G, le terminal mobile consomme entre 0,176% et 1,81% de la batterie par Mo, tandis que pour le WLAN, ces valeurs sont beaucoup moins importantes. Un autre résultat important est que la consommation d'énergie pour l'interface UMTS dépend considérablement de la charge du réseau.

Une autre étude comparative a été proposée par [37]. Les auteurs ont évalué la consommation d'énergie pour une application donnée : l'application mobile YouTube, en utilisant la 3G et WiFi. Ils ont effectué des tests à l'aide d'un téléphone Nokia N95 et l'application Nokia Energy Profiler (NEP1) pour recueillir la consommation de puissance instantanée du téléphone pendant l'expérience. Ils ont constaté que l'énergie consommée, au cours du temps, par l'interface WiFi est plus faible que celle consommée par l'interface 3G, ce qui est différent avec les résultats présentés dans [36].

Une étude similaire a été proposée par Balasubramanian et al [38] présentant une analyse comparative des caractéristiques de consommation d'énergie des interfaces GSM, 3G et WiFi basé sur des mesures. Ils ont constaté que l'interface WiFi est la plus efficace énergétiquement lors de la transmission de données. Cependant, s'ils considèrent le coût énergétique de la recherche des réseaux (scanning) et de l'association avec un point d'accès, ceci n'est pas forcément vrai vu que ce coût n'est pas négligeable. Le GSM consomme plus que la 3G vu que le débit de données du GSM est plus faible et donc le temps de transmission est plus élevé. Une autre constatation est réalisée et concerne l'énergie consommée après la fin de la transmission (ce qu'on appelle énergie de queue). En effet les interfaces cellulaires, le terminal mobile dépense en moyenne 60 % de l'énergie totale de transmission en restant dans un état de forte puissance pendant 12 secondes en 3G et jusqu'à 6 secondes en EDGE.

Dans [39] les auteurs présentent des mesures pour des interfaces sans fil WiFi (mode ad hoc et mode infrastructure), 3G, 2G et Bluetooth, dans les états Idle, transmission et réception de données. Ils mesurent la consommation de puissance pour les différents états de différentes interfaces, ainsi que le coût énergétique du handover entre les interfaces cellulaires (2G et 3G). Ils ont également mesuré la puissance consommée lors de l'envoi des SMS via les interfaces 2G et 3G tout en variant les tailles des SMS. Ces mesures sont obtenues pour un Smartphone Nokia N95 et présentées dans le Tableau 4. En se basant sur ces mesures, les auteurs ont proposé un modèle simple de l'énergie consommée pour l'envoi d'un SMS, exprimé par :

$$E(J) = A + B.L + C.Q(L, 140)$$

Où A, B et C sont des valeurs constantes tirées des différentes mesures effectuées pour les deux interfaces GSM et UMTS. L est la taille du SMS en octets et Q(x,y) représente la partie entier du quotient x/y.

#### II.2.2.4 Synthèse

Comme exposé plus haut, il existe dans la littérature plusieurs modèles et études consacrés à l'évaluation de la consommation d'énergie sur les interfaces radio des terminaux mobiles. Certains proposent des modèles analytiques et d'autres sont basés sur des mesures empiriques. Les modèles proposés dépendent d'un ou de plusieurs paramètres qui peuvent être liés aux conditions de canal (e.g. BER, nombre de stations actives) mais aussi à la nature des flux et particulièrement à la taille des données. Nous résumons ces modèles dans le tableau suivant :

Modèle de consommation d'énergie	Technologies	Analytique	Mesures	Description
C.Poellabaur et al [26]	IEEE 802.11	oui	non	Modèle basé sur la taille des paquets et le taux d'erreur binaire BER
Yu Xiao et al[30]	IEEE 802.11	non	oui	Modèle basé sur les mesures exprimé en fonction des caractéristiques des flux de données
Kuo-Chang Tinga et al [27]	IEEE 802.11	oui	non	Modèle d'énergie de l'envoi d'un paquet selon le mécanisme DCF, exprimé en fonction du nombre de stations actives sur le canal
				Modèle d'énergie pour l'envoi d'un

Perrucci et al [39]	Cellulaire (2G-3G)	non	oui	SMS exprimé en fonction de la taille du SMS
L.Wang [34]	Cellulaire 3G	non	oui	Modèle de l'énergie consommée dans l'état DCH exprimée en fonction de la taille des données, taille des PRB et l'intervalle d'envoi du paquet.

Tableau 3: Classification des modèles énergétiques

D'un autre côté, plusieurs autres études présentent des mesures empiriques de la consommation énergétique des interfaces, en tenant compte des différents états de l'interface (cf. Section II.2.1). Le tableau suivant (Tableau 4) présente une synthèse de principaux résultats de ces travaux.

Technologie	Opération/Etat	Puissance en mW	Précisions et références
<b>Bluetooth</b>	Activation	12	(Nokia N95[39])
	Désactivation	15	(Nokia N95[39])
	En veille	67	(Nokia N95[39])
	Découverte	223	(Nokia N95[39])
	Réception	425	(Nokia N95[39])
	Transmission	432	(Nokia N95[39])
<b>WiFi (mode infrastructure)</b>	Connexion	868	(Nokia N95[39])
	Déconnexion	135	(Nokia N95[39])
	En veille	[650 – 1038]	1038 (Nokia N95[30])
			650 (HTC G1[30])
			884 (Nokia N810[30])
	Sleep	[42 – 88 ]	58 (Nokia N95[39])
			88 (Nokia N95[30])
			68 (HTC G1[30])
			42 (Nokia N810[30])
	Réception	[900 – 1585]	1450 Téléchargement [39](4.5 Mbps)
			1585 (Nokia N95[30])
			900 (HTC G1[30])
			1181 (Nokia N810[30])
	Transmission	[1097– 1687]	1687 (Nokia N95[30])
			1097(HTC G1[30])
			1258(Nokia N810[30])
<b>WiFi (mode Ad hoc)</b>	Transmission	1629	1629 (Nokia N95[39])

	Réception	1375	1375 (Nokia N95 [39])
	Veille	979	979 (Nokia N95[39])
<b>LTE</b> (LTE USB dongle)	Transmission	[1910–3030]	1910 (50 PRB-12 UL MC S[40])
			3030(100PRB-12 UL MCS[40])
	Réception	[1940–2090]	1940 (5 DL MCS[40])
			2090 (20 DL MCS[40])
	Idle	500	[40]
<b>2G</b>	Réception	500	500 (44 kbps, Nokia N95 [39] )
	Handover 2G ->3G	591	591 (Nokia N95[39])
	Réception	1400	1400 (1Mbps, Nokia N95[39] )
<b>3G</b>	Handover 3G->2G	591	591 (Nokia N95[39]))
	DCH	[742–1250]	1250 (Android Dev Phone 2[35])
			742 (Nokia N95[37])
	FACH	[549 – 630]	630(Android Dev Phone 2[35])
			549 (Nokia N95[37])
	PCH	282	282 (Nokia N95[37])
	IDLE	150	150 (Android Dev Phone 2[35])

Tableau 4: Puissances mesurées pendant les différents états des interfaces  
(WiFi, 2G, 3G, LTE et Bluetooth)

Notons que la plupart de ces études concernent des terminaux monomodes ou utilisant une interface à la fois. Or dans les environnements actuels, hétérogènes, des réseaux sans fil, les terminaux mobiles sont plutôt multi-modes et offrent aux utilisateurs la possibilité d'utiliser plusieurs interfaces simultanément ce qui impacte nécessairement la consommation d'énergie du mobile. Une optimisation globale sur l'ensemble des interfaces, mais aussi côté réseau d'accès semble nécessaire.

Dans la suite, nous commençons par analyser l'état de l'art en ce qui concerne les techniques d'optimisation d'énergie sur les terminaux mobiles et sur les réseaux d'accès radio avant de poursuivre avec l'exposé de nos contributions dans les chapitres suivants.

### **II.2.3 Techniques d'optimisation d'énergie**

Dans la problématique considérée des réseaux d'accès radio hétérogènes, les HetNets, un terminal évoluant dans une zone où plusieurs réseaux se superposent, peut exploiter plusieurs interfaces à la fois. Les différents flux applicatifs et de signalisation peuvent en théorie passer par les différentes technologies disponibles, en fonction de certains critères d'optimisation à définir. De prime abord, l'utilisation simultanée de plusieurs interfaces réseau sur les terminaux mobiles ne pourrait pas être efficace lorsque l'on considère la capacité limitée des batteries qui représente encore une contrainte majeure. Cependant, dans certains cas, le choix d'une interface plutôt qu'une autre peut apporter des bénéfices aussi bien pour l'opérateur que pour le terminal. Ainsi, dans certains cas, l'opérateur peut souhaiter décharger un réseau cellulaire en basculant le trafic de données d'un ou de plusieurs utilisateurs sur une technologie de type WiFi (offloading) ce qui lui permettra de mieux servir les autres utilisateurs. On parle ici de techniques de basculement des sessions qui suppose l'exploitation de plus d'une interface radio à la fois du moins en termes de signalisation. Dans la littérature, il existe plusieurs solutions qui proposent l'automatisation de ce basculement en visant cette fois la préservation de la capacité énergétique du terminal mobile. D'autres travaux se sont intéressés à la gestion conjointe de l'ensemble des interfaces des terminaux mobile. Ces travaux partent de l'idée que sur le plan énergétique, chaque technologie peut être plus adaptée à un type de flux en termes de volumes ou de tailles de paquets par exemple. D'autres considérations sont également évoquées telles que la consommation d'énergie dans les différents états de chaque interface ainsi que le coût énergétique des opérations de scan et d'association, qui dans certains cas s'avèrent loin d'être négligeables.

#### **II.2.3.1 Sélection d'interface**

Dans la littérature, il existe plusieurs propositions pour la sélection d'interface avec comme objectif d'augmenter la durée de vies des terminaux mobiles. De manière générale, la sélection d'interface passe généralement par trois phases presque similaires à celles d'une opération de handover, à savoir :

- La collecte d'informations
- L'analyse et la prise de décision
- L'exécution de la décision

La phase de collecte d'informations est l'une des phases les plus importantes et difficile pour différentes raisons dont l'identification des informations à collecter et des sources de collecte, mais aussi parce qu'elle peut être elle-même très consommatrice en termes d'énergie ce qui va à l'encontre à l'objectif initial qui est la préservation de l'énergie sur le terminal.

Les informations à collecter et sur lesquels se baseront les décisions peuvent être statiques ou très stables dans le temps, ou alors très dynamiques avec des fluctuations assez importantes.

Parmi les critères les plus utilisés dans la littérature, nous pouvons citer :

- Informations sur le flux : quantité des données à transmettre, tailles des paquets, QoS exigée
- Technologie et capacité et charge des réseaux disponibles
- Qualité des canaux radio pour chaque réseau disponible
- Mobilité de l'utilisateur

La détermination des paramètres les plus importants à considérer, ou l'attribution de poids indiquant leurs importances est une tâche difficile. De même l'approche décisionnelle à utiliser n'est pas évidente et dépendra elle-même des paramètres à considérer et de l'architecture de la solution visée (optimisation locale ou globale, solution centralisée ou distribuée). Dans la littérature, plusieurs approches ont été étudiées telles que les fonctions de coût, les fonctions d'utilité, à base de règles ou utilisant la théorie des jeux.

D'un autre côté, la sélection d'interface peut être réalisée à deux échelles différentes : à l'échelle flux ou à l'échelle paquet.

En ce qui concerne les approches décisionnelles, nous pouvons citer un grand nombre de travaux ([41], [42], [43], [44]) visant la conservation d'énergie pour des opérations de handover vertical (*VHO : Vertical HandOver*). Dans [41], les auteurs ont proposé un algorithme de handover vertical entre les technologies GSM, GPRS, WiFi, UMTS et WIMAX. La solution est basée sur la logique floue et prend en considération, pour ses décisions, plusieurs paramètres tels que le niveau du signal reçu, la vitesse du terminal mobile, le niveau de batterie ainsi que le débit. Un handover est déclenché dès qu'un nouveau réseau obtient un score supérieur à celui du réseau courant.

Une stratégie différente est suivie dans [42]. Les auteurs ont proposé d'utiliser les informations de contexte pour estimer les conditions ambiantes du terminal. Ainsi, ils considèrent des informations

générales telles que le temps, la qualité de la liaison cellulaire ainsi que la position et le déplacement du terminal mobile pour estimer les conditions de canal du réseau WiFi sans avoir besoin d'activer l'interface radio correspondante. La décision de VHO qui consiste ensuite à choisir entre les interfaces WLAN (802.11b) et cellulaire (GSM/EDGE) en se basant sur le signal reçu et sur l'énergie consommée pour chaque flux de données. Cette consommation est estimée en se basant sur le signal reçu sur chaque interface disponible. Néanmoins, pour avoir la position et estimer le déplacement de l'utilisateur, les auteurs reposent sur l'utilisation des signaux GPS qui peuvent elle-même engendrer une consommation non négligeable d'énergie.

Dans [44], les auteurs proposent une plateforme de gestion de contexte permettant de réduire la consommation d'énergie. Cette plateforme est composée de trois modules. Le premier a pour rôle de surveiller en temps réel les différentes interfaces et de collecter des informations liées à la consommation d'énergie et à la qualité de service. Le deuxième module gère les informations de contexte et l'expérience des utilisateurs collectées pour les différents points d'accès ainsi que pour les différentes interfaces radio en termes de QoS et de consommation d'énergie. Le troisième module est responsable de la découverte des réseaux. Cette proposition, malgré qu'elle soit globale et couvre les différents aspects, fait repose sur des modules complexes gérés par les terminaux mobiles et pouvant donc augmenter la consommation d'énergie de ces derniers. En effet, les auteurs intègrent dans leur proposition des méthodes complexes d'apprentissages gourmandes en termes de traitement et de calcul.

### **II.2.3.2 Gestion de l'activité des interfaces radio**

La gestion de l'activité des interfaces radio d'un terminal mobile revient à contrôler les transitions de ces dernières d'un état à un autre. Les interfaces peuvent généralement être placées en mode veille ou actif, en fonction des besoins en connectivité du terminal et de la disponibilité des réseaux. Comme exposé plus haut, ceci est effectué dans l'objectif de limiter la consommation d'énergie sur le terminal.

Dans la littérature, la plupart des mécanismes existants ne tiennent pas compte de la coexistence de plusieurs technologies radio et donc de la multi-modalité. De ce fait, chaque interface est gérée de manière indépendante des autres, ce qui ne permet pas d'optimiser de manière assez intelligente et globale le fonctionnement de l'ensemble des interfaces.

A ce jour, il existe très peu de travaux traitant de la gestion des interfaces pour les terminaux multimodaux. Dans [45], les auteurs proposent un mécanisme de gestion d'interfaces ayant comme objectif la réduction de la consommation d'énergie sur les terminaux. Les auteurs proposent que le terminal puisse recevoir les messages de signalisation relatifs aux réseaux WLAN et traditionnellement diffusés par les points d'accès WiFi, via les interfaces cellulaires. Les auteurs se basent sur deux hypothèses : la première est que les interfaces WiFi sont plus gourmandes en termes d'énergie, la seconde est que les terminaux sont généralement connectés en permanence sur les



réseaux cellulaires. En cas d'inactivité (i.e. absence de données à transmettre), la solution propose de forcer l'interface WiFi en mode Veille tout en garantissant au terminal d'avoir une visibilité (indirecte) sur son environnement WiFi, ceci via les réseaux cellulaires. Cette proposition se concentre donc sur l'économie d'énergie que l'on pourrait faire en prolongeant la durée de mise en Veille de l'interface WiFi. Elle ne concerne pas les économies possibles en cours de transmission et surtout, nécessite que les stations de base des réseaux cellulaires diffusent des informations géo-localisées, personnalisées et assez précises sur l'environnement WiFi de l'utilisateur. Avec un principe similaire, un mécanisme de gestion d'interfaces pour les applications voix (de type VoIP) est proposé dans [46]. L'idée cette fois est d'utiliser la technologie Bluetooth consommant moins d'énergie, pour contrôler à distance le réveil et la mise en veille des interfaces WiFi. Là aussi les auteurs partent de l'hypothèse que la technologie Bluetooth consomme peu d'énergie comparée aux autres technologies radio. Cependant, l'architecture nécessaire ainsi que la faisabilité technique de cette proposition ne sont pas assez développées.

### **II.2.3.3 Le contrôle de puissance**

Dans les réseaux cellulaires, le contrôle de puissance consiste à ajuster le niveau de puissance des transmissions du mobile en fonction du contexte radio de ce dernier. Ces ajustements sont assez fréquents (2 fois par seconde pour les systèmes GSM, 800 fois par seconde pour les réseaux CDMA et à chaque allocation dans le cas du LTE). L'objectif principal étant de réduire les interférences entre les terminaux mobiles et de maximiser la capacité du réseau. Mais ces ajustements permettent également d'optimiser les ressources énergétiques sur le terminal mobile en n'utilisant que la puissance nécessaire et suffisante pour chaque transmission.

Dans la littérature, plusieurs travaux ont été dédiés à la conservation d'énergie par le mécanisme de contrôle de puissance dans les réseaux sans fil.

Dans [47], les auteurs ont proposé un mécanisme de contrôle de puissance dans le cadre des réseaux cognitifs. La solution proposée se base sur la théorie des jeux avec une fonction d'utilité qui prend en considération les interférences reçues par chaque nœud et causées par les autres nœuds utilisant le même canal radio. Ils ont montré que le contrôle de puissance utilisé conjointement avec une procédure optimisée de sélection de canal est la meilleure solution en termes de débit, de consommation d'énergie et d'équité entre utilisateurs.

Dans [48], le problème de contrôle de puissance pour les liaisons montantes (DS-CDMA) est étudié. Les auteurs proposent que les utilisateurs du réseau soient autorisés à choisir leurs puissances d'émission afin de maximiser leurs fonctions d'utilités qui mesure le nombre de bits transmis par unité d'énergie exprimée en Joule.

## II.3 Optimisation de la consommation d'énergie au niveau du réseau d'accès

Dans les sections précédentes nous avons présenté les différents travaux traitant du contrôle de la consommation d'énergie des terminaux mobiles. Cependant, la plus grande part d'énergie consommée pendant une communication se retrouve au niveau du réseau. Sur les réseaux cellulaires par exemple, on estime que les stations de base consomment à elles-seules, environ 60% de la totalité de la quantité d'énergie.

### II.3.1 Modèles énergétiques

De façon générale, la consommation de puissance d'une station de base peut être décomposée en deux parties. Une partie fixe et une partie variable.

La première ne dépend pas du niveau de charge et donc des transmissions en cours de la station de base. Elle inclue la puissance consommée essentiellement par deux dispositifs : le « *rectifier* » et la climatisation.

La deuxième partie est consommée quand la station de base est active. Elle dépend du nombre d'utilisateurs et du volume du trafic généré dans la cellule. Elle comprend principalement, l'énergie utilisée par l'amplificateur de puissance et celle utilisée par l'émetteur-récepteur (*Transceiver*).

Dans la littérature, plusieurs modèles de consommation d'énergie ont été proposés pour les stations de base [49], [50].

Malheureusement, ces modèles ne concernent pratiquement que les Macro stations de base et ne sont pas applicables tels quels aux petites stations (de type pico et femto) de plus en plus présentes dans les réseaux HetNet. En effet, dans [51], les auteurs montrent que pour ces stations dites de faible puissance, la charge du réseau affecte seulement moins de 30% de la consommation globale. Les auteurs proposent alors un nouveau modèle énergétique suivant, applicables aux différents types de stations de bases:

$$P_{in} = \begin{cases} N_{TRX} \cdot (P_0 + \Delta_p P_{out}), & 0 < P_{out} \leq P_{max} \\ N_{TRX} \cdot P_s, & P_{out} = 0 \end{cases}$$

Où :

$N_{TRX}$  est le nombre de chaînes d'émission-réception.

$P_{max}$  est la puissance maximale atteinte lorsque la charge de la station de base est maximale.

$P_s$  représente la consommation de puissance en mode Veille (*sleep*)

$P_0$  représente la consommation de puissance de la station de base dans l'état d'inactivité ( $P_{out}=0$ ).

$P_{out}$  correspond à la puissance de transmission et

$\Delta_p$  est un facteur qui reflète l'augmentation de la puissance consommée par l'amplificateur en fonction de la charge (facteur lié à la charge de la station de base).

Pour ces différents paramètres du modèle, les auteurs proposent certaines valeurs que nous avons reprises sur le Tableau 5 :

Type de la station de base	$N_{TRX}$	$P_{max}$ (W)	$P_0$ (W)	$\Delta_p$	$P_s$ (W)
Macro	6	20	118.7	5.32	93
Micro	2	6.3	53.0	3.1	39
Pico	2	0.13	6.8	4.0	4.3
Femto	2	0.05	4.8	7.5	2.9

Tableau 5: Les valeurs des paramètres du modèle énergétique pour les différents types de stations de base

### II.3.2 Solutions d'optimisation

En ce qui concerne l'optimisation de la consommation d'énergie sur les stations de base, il existe dans la littérature plusieurs approches que l'on peut considérer de façon indépendante ou conjointe.

Parmi ces approches, nous allons nous focaliser dans la suite sur les trois principales qui sont :

- Les techniques d'endormissement
- Les mécanismes d'ordonnancement
- Les approches d'association des utilisateurs

#### II.3.2.1 Techniques d'endormissement

L'endormissement des nœuds pendant les périodes d'inactivité est probablement l'une des techniques les plus étudiées et les plus préconisées pour la conservation d'énergie globale sur les réseaux d'accès radio. Vu qu'une station de base n'ayant rien à transmettre consomme malgré tout une quantité d'énergie non négligeable, l'idée est de mettre en veille (endormir) ces nœuds dès que possible. Ceci affecte bien évidemment la couverture du réseau mais des solutions complémentaires peuvent être utilisées comme par exemple l'extension temporaire des zones de couverture des cellules voisines ou la coopération inter-opérateurs. Les principales difficultés de ces techniques concernent le choix des cellules à endormir et du bon moment pour endormir ou réveiller une station radio.

Dans la littérature, plusieurs travaux ont proposé des solutions pratiques pour l'endormissement des nœuds. Dans [52], les auteurs présentent une solution pour le choix des cellules à mettre en veille basée sur un seuil de la charge moyenne. Une comparaison des niveaux d'activité des cellules permet de déceler si certaines cellules peuvent être endormies après avoir basculé le trafic résiduel sur les

cellules voisines. La valeur du seuil détermine le compromis à faire entre l'économie d'énergie et la performance du réseau. En effet, avec un seuil élevé, un grand nombre de cellules risque d'être mis en veille, ce qui affecte la capacité et les performances du réseau. D'un autre côté, avec un seuil faible, le nombre de cellules mis en mode veille serait très faible, ce qui limiterait le gain énergétique escompté. La détermination de ce seuil constitue donc la principale difficulté de cette approche.

Un travail similaire a été proposé dans [53]. Les auteurs essayent ici de réaliser un compromis entre l'efficacité énergétique et la QoS pour les réseaux 3G. Ils ont étudié les effets d'une mise en œuvre pratique sur la qualité de service et sur la stabilité du système. En particulier, les auteurs ont étudié les effets du temps nécessaire à réactivation des stations mises en veille et qui peut se traduire par la dégradation du débit et par l'apparition d'un effet Ping-Pong.

Dans [54], les auteurs ont considéré le cas d'un réseau LTE HetNets, composé de macro-cellules et micro cellules de type Femto. Ils ont proposé une solution « optimale » pour l'endormissement et la réactivation des micro-stations de base. Les paramètres qu'ils ont considérés pour les prises de décision, incluent la charge de cellules et la localisation des utilisateurs dans les cellules.

### **II.3.2.2 Mécanismes d'ordonnancement**

Les techniques d'ordonnancement (*Scheduling*) font partie intégrante des mécanismes de gestion des ressources radio dans les réseaux sans fil. La limitation des ressources et la fluctuation des conditions radio, mais aussi des flux de données constituent des défis importants pour ces mécanismes.

Les algorithmes d'ordonnancement ont largement été étudiés pour la gestion des ressources et en particulier pour l'allocation dynamiquement sur les canaux partagés, aux différents utilisateurs. Ces mécanismes peuvent se baser sur une multitude de critères et constituent un des éléments déterminant dans le comportement et les performances du système en fonctionnement. Généralement, ce sont les opérateurs eux-mêmes (et non les équipementiers) qui choisissent et paramètrent ces algorithmes, en fonction de leurs stratégies commerciales. Outre les paramètres de QoS, ces mécanismes peuvent donc inclure des critères commerciaux tels que les types d'abonnements et les priorités entre utilisateurs ou les flux.

Dans la littérature, l'enrichissement de ces critères par des aspects liés à la consommation d'énergie prend de plus en plus d'ample.

Dans [55], les auteurs ont proposé un algorithme d'ordonnancement pour les liaisons montantes. Les sous-canaux sont alloués pour maximiser la moyenne arithmétique de l'efficacité énergétique de l'ensemble des utilisateurs.

L'efficacité énergétique d'un utilisateur est exprimée par :

$$u_n(t) = \frac{T_n(t)}{\Delta_e / \Delta_t}$$

Où

$T_n(t)$  est le débit moyen de l'utilisateur  $n$  pour la trame  $t$ .

$\Delta_e$  est l'énergie consommée par l'utilisateur pendant la durée  $\Delta_t$ .

Dans [56], les auteurs ont proposé un ordonnanceur ayant comme objectif de résoudre le problème de l'efficacité énergétique pour l'allocation des ressources de type OFDMA. L'approche proposée prend en considération le coût énergétique lors de l'attribution des blocs de ressources (PRB) aux utilisateurs. L'approche attribue à chaque utilisateur un score déterminé comme suit :

$$1 + \sum_{k=1, k \neq q}^M 1_{\{E_k(t) > E_q(t)\}} + f^i(m_j)$$

Où :

- $E_k(t)$  est la mesure d'énergie évaluée pour un utilisateur donnée sur le bloc de ressource  $k$  à l'instant  $t$
- $M$  est le nombre total de PRBs
- $f^i(m_j)$  est une fonction de pénalité définie en fonction du nombre de PRB déjà alloués à cet utilisateur
- $I$  est la fonction d'indicateur qui renvoie la valeur 1 si la condition dans les crochets est vraie et la valeur 0 si non

Une fois les scores de chaque utilisateur sont estimés, c'est l'utilisateur ayant le plus grand score qui sera servi par la station de base

### II.3.2.3 Association des utilisateurs

Comme nous l'avons présenté dans la section II.3.1, dans les réseaux cellulaires, le nombre d'utilisateurs actifs sur une station de base a un impact important sur la consommation de puissance de celle-ci. Ceci implique que la politique d'association des utilisateurs est un élément déterminant pour la conservation énergétique des stations de base et donc de façon globale, des réseaux d'accès radio.

Dans la littérature, un intérêt de plus en plus croissant est accordé à cet axe de recherche. Nous analyseront les principales approches et techniques dans le chapitre V que nous avons consacré à cette problématique.

### II.3.2.4 Solutions combinées

La conservation d'énergie par la combinaison de plusieurs techniques comme celles présentées dans les sections précédentes a été étudié par quelques travaux. Dans [57] les auteurs proposent une solution distribuée pour les réseaux LTE auto-organisés qui considère l'efficacité énergétique et l'efficacité spectrale et qui traite les problématiques liées à l'allocation des ressources, le contrôle de puissance et l'association des utilisateurs.

Une autre approche combinée est présentée dans [58] visant un compromis entre les performances des flux de données et l'efficacité énergétique. Les auteurs proposent une plateforme pour la conservation d'énergie sur les stations de base et qui englobe la gestion dynamique de l'endormissement des stations de bases et l'association des utilisateurs.

## II.4 Métrique d'efficacité énergétique

La consommation de puissance/énergie en tant que paramètre mesurant l'efficacité énergétique d'un système donné ne reflète pas réellement les performances énergétiques de ce système. En effet il ne suffit pas de considérer uniquement la quantité de puissance consommée d'une entité tel que les stations de base et les terminaux mobiles, il faut la rapporter à son efficacité en termes de performances système tels que la QoS, la couverture, etc. Plusieurs organisations de standardisation se sont intéressées à définir et à proposer des métriques mesurant l'efficacité énergétique des différentes entités des réseaux. Parmi ces organisations, nous pouvons citer l'ATIS « *Alliance for Telecommunications Industry Solutions* » [59] et l'ETSI « *European Technical Standards Institute* ».

La métrique proposée par l'ETSI tient compte de la couverture des cellules pour les technologies WCDMA, LTE et WiMax. L'efficacité énergétique est alors exprimée en  $[km^2/W]$  [60] et définie comme suit:

$$EE_{coverage} = \frac{A}{P}$$

Où  $A$  est la couverture de la cellule et  $P$  est la puissance de l'équipement.

Parmi les autres propositions de métriques d'efficacité énergétique, la plus connue et la plus utilisée dans la littérature est dénotée ECR (Energy Consumption Rating) [61]. Elle met en rapport l'énergie consommée et le débit offert et est exprimée en Watt/Gbps. Elle est calculée comme suit :

$$ECR = \frac{\text{énergie}}{\text{débit}}$$

Cependant, cette métrique ne concerne que la quantité d'énergie consommée pendant les périodes d'activité à charge maximale, vu que l'énergie considérée par cette métrique est la puissance maximale

de la station. Cependant, comme nous l'avons expliqué dans les sections précédentes, la consommation d'énergie des équipements des réseaux, en particulier celle des stations de base, dépend bien de la charge et comprend une partie fixe consommée même pendant les périodes d'inactivité (e.g. en état Veille). Dans ce contexte, d'autres métriques tels qu'ECRW (ECR-Weighted)[61], ECR-VL (ECR-Variable-Load : efficacité énergétique pour une charge variable), ECR-EX (ECR-EXtended-idle : efficacité énergétique en veille)[62] ont été proposées afin d'améliorer et d'enrichir cette approche.

La métrique ECRW est exprimée comme suit :

$$ECRW = \frac{\alpha * E_f + \beta * E_h + \gamma * E_i}{T}$$

Où  $E_f$ ,  $E_h$ ,  $E_i$  et  $T$  représentent respectivement l'énergie à charge maximale (full-load), l'énergie à demi-charge (half-load), l'énergie en veille (idle) et le débit mesuré durant le calcul de ECR.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sont les coefficients qui expriment le degré d'importance des différents modes de fonctionnement et auxquels sont souvent donnés les valeurs suivantes:  $\alpha = 0,35$ ,  $\beta = 0,4$ ,  $\gamma = 0,25$ .

Dans [63], la métrique TEEER est proposée pour mesurer l'efficacité énergétique des différents équipements d'un réseau :

$$TEEER = -\log\left(\frac{\alpha * P_{max} + \beta * P_{50} + \gamma * P_{sleep}}{T}\right)$$

Où  $P_{max}$ ,  $P_{50}$  et  $P_{sleep}$  correspondent aux valeurs de puissance à des niveaux de charge différents (maximale, moitié, minimale)  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  ont les mêmes valeurs comme pour ECRW.

Les auteurs ont également proposé une métrique qui mesure l'efficacité énergétique des amplificateurs de puissance qui est exprimée par :

$$TEEER_{amplifier} = \frac{\text{Puissance totale RF de sortie}}{\text{Puissance totale d'entrée}} * 10$$

Puissance totale RF d'entrée =  $NbrS * NbrP * P1 * P2$

Puissance totale RF de sortie =  $NbrS * NbrP * P1$

Avec  $NbrS$  est le nombre de secteurs sur la station,  $NbrP$  est le nombre de porteuses par secteur,  $P1$  est la puissance de sortie par porteuse (mesurée à l'entrée de l'antenne) et  $P2$  est la puissance d'entrée nécessaire pour avoir un Watt à la sortie.

Dans le même contexte, une autre proposition TEER (Telecommunications Energy Efficiency Ratio) est décrite dans [64]. Elle considère le rapport entre le « travail utile » (débit de donnée) par la puissance

consommée et qui est exprimée en [Gbps/Watt]. Cette technique prend en compte le niveau d'utilisation de la station de base en considérant trois niveaux de puissance (0%, 50% et 100%) mais avec des poids identiques et ayant une valeur fixe égale à 1/3 :

$$TEER = \frac{D}{0.33 * P0 + 0.33 * P50 + 0.33 * P100}$$

Où P0, P50 et P100 désignent les puissances utilisées pour les niveaux de charge à 0%, 50% et 100%. D représente le débit.

Une autre métrique est proposée dans [65]. Les auteurs s'inspirent de la thermodynamique et introduisent la notion de température du système. Utilisant différents exemples, les auteurs affirment que cette mesure peut être appliquée à tout système et composant des TIC. Ils proposent alors la métrique suivante :

$$dB\xi = 10 \log_{10} \frac{\text{Puissance/Débit}}{kT \ln 2}$$

Où k est la constante de Boltzmann et T est la température du milieu (en Kelvin).

Le tableau suivant résume les différentes métriques d'efficacité énergétique :

Métrique	Description	Unité
EE_coverage	Le rapport entre la couverture de la cellule et la puissance consommée par la station de base	km <sup>2</sup> /W
ECR	Rapport entre l'énergie consommée sous une charge maximale et le débit	Watt/Gbps
ECRW	Rapport entre l'énergie consommée sous des charges variable et le débit	Watt/Gbps
ECR-VL		Watt/Gbps
ECR-EX		Watt/Gbps
TEER	Rapport entre le « travail utile » et la puissance consommée	Gbps/Watt
dBξ	Rapport entre la puissance consommée par Gbps (puissance/débit) et la température de l'équipement.	-
TEEER	$-\log \frac{\text{Puissance}}{\text{Débit}}$	-

Tableau 6: Métriques d'efficacité énergétique



## II.5 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons présenté l'état de l'art sur la conservation d'énergie dans les réseaux sans fil hétérogènes et en particulier pour les réseaux d'accès. Après avoir analysé l'évolution de la conservation d'énergie de façon générale dans les TIC, nous avons présenté les principaux modèles (analytiques et empiriques) et études consacrés à la consommation d'énergie pour les terminaux mobiles et sur les réseaux d'accès radio. Nous avons souligné le fait que, en plus des différences par technologie, plusieurs paramètres et procédures affectent la consommation d'énergie sur les interfaces radio. Ceux-ci incluent par exemple, le volume des données et la taille des paquets, la durée des transmissions, la charge du réseau et les conditions radio. Tous ces paramètres rendent difficile la proposition d'un modèle générique unique, global et satisfaisant.

Dans ce même chapitre, nous avons également analysé les techniques proposées dans le cadre des réseaux d'accès radio. Nous avons distingué deux axes de conservation d'énergie dans ce contexte.

Le premier axe vise à diminuer la consommation d'énergie sur les terminaux mobiles afin de réduire les interférences, d'augmenter la capacité et la durée de vie des batteries. Ceci peut être réalisé par des mécanismes de sélection et de gestion des interfaces radio ou encore par le contrôle de puissance.

Il est intéressant ici de noter que l'exploitation de nouveaux protocoles multi-chemins, (e.g. SCTP, MPTCP) peut permettre de proposer des solutions nouvelles pour la sélection d'interfaces et pour l'ordonnancement des paquets de données dans le contexte des réseaux d'accès hétérogènes et avec des terminaux multimodaux. Une conséquence logique serait également de proposer une solution globale et intelligente pour la gestion conjointe de l'ensemble des interfaces radio sur ces terminaux.

Le deuxième axe concerne la conservation d'énergie sur les stations de base. Plusieurs travaux de la littérature montrent que plus que la moitié de l'énergie consommée par les réseaux d'accès est due à l'activité ces stations. Dans cette optique, plusieurs techniques ont été proposées telles que les approches d'endormissement des stations de bases, les algorithmes d'ordonnancement et les mécanismes d'association des utilisateurs.

# **III. Contribution I : Optimisation de l'ordonnancement Up Link sur des environnements d'accès radio hétérogènes**

## **III.1 Introduction**

L'évolution et la coexistence de plusieurs technologies de réseaux sans fil offrent à l'utilisateur un environnement riche qui, s'il est judicieusement exploité, peut garantir de meilleures QoS pour les différents services. L'apparition et la généralisation de cet environnement hétérogène, où plusieurs types de réseaux, essentiellement les hotspots Wifi et les réseaux cellulaires de différentes générations, coexistent et se superposent, a été accompagnée par une évolution des terminaux mobiles qui supportent aujourd'hui plusieurs standards radio simultanément. On les désigne par terminaux multimodaux.

L'utilisation simultanée de plusieurs interfaces radio sur ces terminaux semble attractive et intéressante. En effet, elle permettrait d'augmenter les débits pour l'utilisateur grâce à l'utilisation parallèle de plusieurs canaux radio. Elle permettrait également une mobilité verticale (i.e. mobilité entre réseaux d'accès hétérogènes) sans couture en garantissant la continuité des flux et donc des sessions.

Cependant, l'exploitation de plusieurs interfaces radio se heurte à différentes problématiques et nécessite de revoir un certain nombre de procédures réseau dont l'ordonnancement des paquets sur les différentes interfaces et le routage multi-chemin de ces paquets qui peuvent traverser des réseaux et domaines différents avec des paramètres de QoS disparates. Ceci introduit également une nouvelle problématique qui concerne la maîtrise de la consommation d'énergie, essentiellement sur le terminal mobile que nous considérons dans cette thèse. En effet, l'activation et/ou l'utilisation de plusieurs interfaces réseau va induire une augmentation significative de la consommation d'énergie ce qui impliquerait une dégradation de la qualité d'expérience (QoS) de l'utilisateur.

De manière générale, l'utilisation simultanée de plusieurs interfaces nécessite des solutions nouvelles au niveau des différentes couches protocolaires aussi bien sur le plan de donnée que sur le plan de contrôle. Au niveau du transport par exemple, il existe aujourd'hui de nouveaux protocoles tels que le MPTCP (I.2.2.3) ainsi que certaines évolutions IP qui permettent l'utilisation simultanée de plusieurs chemins réseau pour une seule session applicative. Ces protocoles permettent intrinsèquement de basculer les flux de données d'une technologie d'accès à une autre car elles permettent de gérer plusieurs adresses IP source et destination. Cependant, ces propositions ne concernent pas l'ordonnancement des paquets sur les différentes interfaces disponibles ni la gestion proprement dite de ces dernières (e.g. activation, sélection et décision d'utilisation).

Dans ce chapitre, nous proposons d'étudier la problématique de sélection d'interfaces et d'ordonnancement des paquets en considérant comme objectif l'optimisation mutuelle de la QoS et de la consommation d'énergie. Dans un premier temps, nous présenterons les métriques énergétiques et les modèles de consommation d'énergie que l'on utilisera ensuite comme base pour proposer une solution d'ordonnancement des paquets pour la liaison montante (UL : Uplink) optimisant la consommation d'énergie sur les terminaux mobiles. Les performances de cette proposition seront présentées et discutées dans la dernière section de ce chapitre.

## III.2 Ordonnancement et conservation d'énergie dans les réseaux hétérogènes

Nous considérons ici la problématique d'ordonnancement UL sur des terminaux multimodaux. Il s'agit de sélectionner une interface parmi les celles disponibles afin d'envoyer les données générées par les applications et les services de l'utilisateur. Ce choix peut se faire à deux niveaux (cf. **Figure 7**):

- Au niveau flux: dans ce cas, l'ordonnancement se résume à l'association flux/interface qui s'effectue à une échelle temporelle relativement large. Il s'agit de sélectionner l'interface la plus appropriée pour un flux donné, à priori pour toute la durée de la session. Cependant, ce choix peut être remis en cause et modifié pour diverses raisons telles que des fluctuations importantes de la QoS sur l'interface choisie ou l'indisponibilité du réseau choisi, par exemple à cause de la mobilité du terminal. Il s'agit donc d'une re-sélection d'interface.
- Au niveau paquet: dans ce cas, l'ordonnancement est effectué paquet par paquet et donc à une échelle de temps beaucoup plus faible. Cet ordonnancement suppose la disponibilité d'au moins deux interfaces capables d'offrir (chacune ou ensemble) une QoS acceptable pour le flux auquel appartiennent les paquets. Les décisions sont alors prises pour chaque paquet en fonction de critères, entre autre temps réel, relatifs par exemple aux conditions radio très fluctuantes et aux conditions réseau en général. Des problèmes annexes sont soulevés par ces techniques tels que la préservation de l'ordre d'arrivée des paquets à la destination puisque les

paquets successifs pourraient emprunter des chemins différents et atteindre la destination dans le désordre et avec des délais pouvant être très disparates. Des solutions complémentaires sont donc nécessaires pour ce type d'ordonnancement, englobant les protocoles de routages multi-chemin avec des mécanismes d'acquittement et de contrôle de flux adaptés. De tels mécanismes sont déjà proposés dans la littérature ou en cours de spécification comme le protocole MTCP (cf. I.2.2.3).

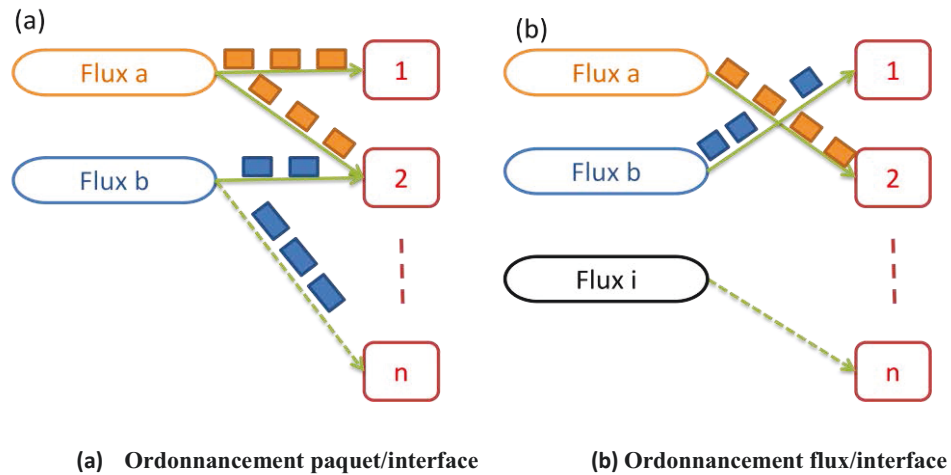


Figure 7: Ordonnancement paquet versus flux

De façon générale, tous ces mécanismes d'ordonnancement reposent sur des approches de décision multicritères qui se basent essentiellement sur des paramètres de QoS. Cependant, la richesse et l'évolution de l'environnement (environnement radio et hétérogène, utilisation de terminaux en mobilité, ...) poussent à considérer plus de critères, risquant de rendre ces mécanismes plus complexes.

En effet, dans le cadre du contexte considéré dans cette thèse, plusieurs nouveaux critères peuvent être considérés dans le choix de l'interface, que se soit pour l'ordonnancement au niveau paquet ou au niveau flux. Ceux-ci peuvent émaner de l'hétérogénéité des réseaux (technologies, architectures, services, ...) ou afin de satisfaire l'utilisateur en améliorant sa qualité d'expérience, y compris en ce qui concerne la durée de vie de la batterie embarquée sur son terminal et qui est aujourd'hui une ressource limitée.

L'énumération de l'ensemble des critères possibles ne peut être exhaustive. Certains de ces critères sont interdépendants tels que la taille des cellules et les puissances utilisées par les stations de base ou le rapport signal à bruit et le taux d'erreur binaire. Nous avons, cependant, consacré la section suivante à la présentation des critères les plus utilisés dans la littérature en les enrichissant par de nouveaux,

ceux les plus utiles à notre sens pour la problématique considérée. Dans ce qui suit, nous les énumérons en les classant par catégories.

### III.2.1 Critères de décision

Comme discuté plus haut, les critères de décision incluent essentiellement ceux liés à la QoS. A ceux-ci s'ajoutent ceux spécifiques aux technologies et réseaux sans fil considérés, à la mobilité et enfin ceux liés directement à la consommation d'énergie et non suffisamment pris en compte jusqu'ici.

De manière générale, les critères considérés sont les suivants :

- **Les exigences de QoS:** ils incluent les exigences en termes de qualité de services (QoS) qui dépendent du type du flux applicatif :
  - Le débit : C'est la quantité de données qui peut être transmise par unité de temps. Il est considéré comme le principal indicateur de la qualité du réseau vu par les applications non temps réel. Aujourd'hui, ce paramètre est largement limité par les réseaux d'accès de type radio, où les ressources disponibles, malgré leur croissance d'une génération à une autre, restent limitées et coûteuses.
  - Le taux d'erreurs binaire (BER) et le taux d'erreur binaire résiduel : Ce sont des indicateurs importants qui reflètent la qualité finale du lien et qui affectent directement les performances des applications sur le réseau. Si certains taux d'erreurs binaires peuvent être corrigés par des mécanismes de type CRC (Cyclic Redundancy Check), les applications ne sont pas toutes égales devant ce paramètre. En effet, les applications transactionnelles ou de transfert de fichier restent les plus exigeantes et nécessitent souvent des retransmissions afin de garantir l'intégrité des données.
  - Le délai et sa variation (la gigue) : Ces deux paramètres concernent les temps d'accès et de transfert et peuvent être affectés par la charge du réseau, par les mécanismes d'allocation de ressources radio et de routage. Ils sont critiques pour les applications temps réels ou de streaming.
  - Le niveau de sécurité exigé et le coût monétaire: Ces paramètres concernent le degré de confiance que peut avoir un utilisateur par rapport aux réseaux (concerne essentiellement les hotspot WiFi puisque les réseaux cellulaires sont considérés sécurisés d'office), et le coût monétaire (en cas de roaming par exemple où des surcoûts assez importants sont généralement appliqués).
- **Les préférences et l'expérience des utilisateurs :** Ces critères peuvent inclure l'opérateur et les technologies préférés, l'ordre de priorité des applications en cours et les coûts des

communications. De façon générale, ces critères incluent également le degré de satisfaction des utilisateurs, que l'on qualifie par Qualité d'Expérience (QoE) et qui reste un critère subjectif difficilement mesurable. Des approches d'estimation et d'apprentissage sont souvent utilisées pour déduire le taux de satisfaction à partir de critères plus objectifs et mesurés [66].

En complément à ceux cités plus haut, et de manière spécifique aux réseaux sans fil (objet de notre thèse), d'autres critères liés directement au support radio doivent être considérés. Ce sont des paramètres souvent très dynamiques et exigeants des adaptations quasi temps réel des mécanismes subjacents.

- **Critères liés aux réseaux :** Il s'agit des conditions des réseaux disponibles et des états et caractéristiques des interfaces radio du terminal. Concernant les informations liées aux réseaux, il existe plusieurs paramètres ou mesures possibles souvent utilisés pour comparer les différents canaux radio disponibles, de manière brute, ou comme indicateurs de performances (*KPI : Key Performance Indicators*). Ceux-ci incluent :
  - La qualité du signal radio souvent exprimée en termes de puissance ou de rapport de ce signal aux niveaux des interférences et du bruit ambiant (*RSS (Received Signal Strength)*, *SNR (Signal-to-Noise Ratio)*, *SINR (Signal-to-Interference & Noise Ratio)*)
  - Le débit disponible (aussi exprimé en tant que bande passante) ainsi que la charge actuelle du réseau (comparée par rapport à sa capacité théorique)
  - Taux d'erreurs binaire (*BER : Bit Error Rate*)
  - Mode ou niveaux de sécurité du réseau.
- **Critères liés aux terminaux mobiles :** Ces critères concernent le terminal de l'utilisateur et son mode d'utilisation. Ils incluent souvent la mobilité (e.g. modèle de mobilité, vitesse, environnement où le terminal évolue tel qu'urbain ou rural), la capacité énergétique du terminal, le niveau de charge de sa batterie et les technologies radio supportées par l'équipement (terminaux mobiles multi-modes). Concernant les informations liées aux interfaces, on retrouve entre autre, les différents états de ces interfaces (Veille, Actif, Désactivé).
- **L'énergie :** Ce paramètre est lié à la fois aux réseaux et aux terminaux mobiles. Il peut être détaillé pour chaque opération sur ces interfaces telle que l'activation, le scanning, l'association et l'envoi ou la réception des données (cf. II.2.2).

Ces critères peuvent être considérés en totalité ou en partie et dans un ordre qui dépendra des objectifs des algorithmes d'ordonnancement qui sont décrits dans la section suivante.

### III.2.2 Algorithmes d'ordonnancement

Dans la littérature, plusieurs travaux proposent des solutions pour l'ordonnancement des flux de données ([67], [68], [69]). Cependant la fluctuation et l'instabilité des conditions radio à laquelle s'ajoutent les effets causés par la mobilité des utilisateurs et la variation de la charge des réseaux, rendent l'association des flux applicatifs aux différentes interfaces inefficace. Les décisions prises peuvent être rapidement dépassées par les variations continues des conditions radio. Un ordonnancement au niveau paquet semble à priori plus judicieux. A cette difficulté, s'ajoute la possibilité des couches basses (PHY) de s'adapter aux conditions ambiantes en modifiant un certain nombre de paramètres liés à l'allocation des canaux, des blocks de ressources par exemple.

Dans la littérature, il existe plusieurs algorithmes qui traitent du problème de l'ordonnancement des paquets ([70], [71], [72], [73]) et dont un sous ensemble sera décrit plus bas. La complexité et les performances de ces algorithmes dépendent des approches utilisées et du choix et de l'utilisation des critères décrits dans la section précédente.

- **Round Robin (RR)** : dans cet algorithme d'ordonnancement tous les paquets ont la même priorité et sont affectés aux différentes interfaces d'une manière cyclique. Tous les paquets des flux actifs sont servis à tour de rôle. L'algorithme de base est non adaptatif (priorité des flux, tailles des paquets et conditions de canal). Un des inconvénients majeurs de cet ordonnanceur est qu'il ne tient pas compte des capacités fluctuantes des interfaces ni des exigences des applications en termes de QoS.
- **Weighted Round Robin (WRR)** [72] : c'est une version améliorée de l'algorithme précédent (RR). Les paquets sont traités par classes. En effet, le WRR donne un poids normalisé à chaque flux en fonction de critères de QoS et les paquets ayant le poids le plus important sont servis en premier.
- **Surplus Round Robin (SRR)** : cette amélioration du WRR est utilisée pour transmettre des paquets de tailles différentes à travers des liens hétérogènes en adaptant les poids en fonction d'un certain nombre de critères.
- **Earliest Delivery Path First (EDPF)** : le principe de cet ordonnanceur est d'estimer dynamiquement le temps nécessaire pour transmettre les paquets sur chacun des liens disponibles [71]. Pour chaque session de transmission, EDPF sélectionne une seule interface pour toute sa durée.
- **Multipath Transmission Concurrent Scheme (CMTS)** : Contrairement à EDPF, cet algorithme sélectionne une seule application, pour ordonnancer les paquets correspondants sur

des liens multiples. Il envoie les paquets entre des chemins lents et rapides pour que le récepteur les reçoive dans le bon ordre afin de réduire les délais de la réorganisation [74].

- **Socket-level Bandwidth Aggregation Mechanism (SBAM)** : Cet ordonnanceur se base sur le produit délai-bande passante (Bandwidth Delay Product BDP) de chaque interface réseau. Le principe de cet algorithme est d'envoyer en premier lieu les données sur l'interface ayant la valeur maximale de BDP. Si l'autre extrémité supporte SBAM, le système exploite les autres interfaces et les paquets sont répartis sur les différentes interfaces en fonction de leur BDP [70].

Après l'analyse de ces mécanismes, nous avons choisi de les classer selon trois critères (cf. Tableau 7) :

- Adaptabilité aux conditions radio
- Différentiation en fonction de la QoS
- Prise en compte de la consommation d'énergie

Mécanisme	Adaptabilité aux conditions radio (Oui/Non)	QoS	Optimisation de la consommation d'énergie
<b>Round Robin (RR)</b>	Non	Pas de différenciation	Non
<b>Weighted Round Robin (WRR)</b>	Non	Différenciation basée sur des poids	Non
<b>Surplus Round Robin (SRR)</b>	Non	Différenciation basée sur des poids : Le poids attribué à un flux peut être choisi proportionnel au débit réservé	Non
<b>Earliest Delivery Path First (EDPF)</b>	Oui (décision basée sur les délais de livraison des liens)	Pas de différenciation	Non
<b>Multipath Transmission</b>	Oui (les paquets sont envoyés sur le lien le	Pas de différenciation	Non



<b>Concurrent Scheme (CMTS)</b>	plus rapide)		
<b>Socket-level Bandwidth Aggregation Mechanism (SBAM)</b>	Oui (les paquets sont envoyés via l'interface ayant le BDP le plus élevé)	Pas de différenciation	Non
<b>Earliest Deadline First (EDF)</b>	Non	Différenciation basée sur la date d'échéance de chaque paquet	Non

Tableau 7: Algorithmes d'ordonnancement de paquets

Comme présenté ci-dessus, la plupart de ces algorithmes planifient l'ordre de transmission des paquets dans le but de réduire les délais (en choisissant les liens les plus rapides ou l'interface ayant le BDP le plus élevé) ou encore pour réduire les délais de réorganisation des paquets à la réception.

Cependant rares sont les travaux qui ont considéré l'énergie comme critère de décision. Pourtant, l'énergie consommée par les transmissions des données constitue une part importante de l'énergie totale consommée sur les terminaux mobiles, en particulier quand les interfaces radios sont actives (cf. II.2.2.4). De plus, avec l'apparition des protocoles multi-chemins qui permettent d'utiliser simultanément plusieurs interfaces en parallèle, la consommation énergétique peut atteindre des valeurs importantes.

Ces dernières années l'intérêt accordé à la conservation d'énergie, à travers des mécanismes de sélection d'interfaces, prend de plus en plus de place au sein de la communauté. Quelques travaux ont abordé la conservation d'énergie pour l'ordonnancement des paquets et des sous-flux. Dans [75] par exemple, les auteurs ont proposé un mécanisme d'ordonnancement de sous-flux de données qui minimise la consommation d'énergies des terminaux multi-homés et ce en choisissant l'interface qui a le coût énergétique minimal pour chaque sous-flux.

C'est dans cet esprit que nous proposons une nouvelle approche pour l'ordonnancement des paquets minimisant la consommation d'énergie sur les terminaux mobiles multimodaux.

### III.3 Optimisation de l'ordonnancement UpLink minimisant la consommation d'énergie

L'analyse présentée dans les sections précédentes montre qu'il existe à ce jour très peu de solutions d'ordonnancement considérant directement la problématique de la consommation d'énergie. Pourtant, les évolutions architecturales et protocolaires des réseaux sans fil actuels, l'apparition des nouveaux protocoles de transports multi-chemins tels que MPTCP et SCTP (cf. section I.2.2.3) nécessitent l'évolution de ces mécanismes pour différentes raisons.

En effet, une des problématiques liées à l'utilisation de plusieurs interfaces et des protocoles multi-chemins pour les transmissions de données réside dans la maîtrise de la consommation d'énergie sur les terminaux mobiles en raison de leurs ressources énergétiques limitées. La consommation d'énergie sur un terminal peut augmenter de façon significative si l'utilisation des différentes interfaces n'est pas contrôlée de manière efficace. Si cette utilisation peut améliorer la QoS en décuplant les débits offerts au mobile, l'épuisement rapide de la batterie d'un terminal mobile impliquera l'absence totale de toute connectivité et donc une diminution radicale de la QoE de l'utilisateur.

En réalité, plusieurs facteurs impactent la consommation d'énergie lors des transmissions. Parmi celles-ci, la mobilité des utilisateurs, les variations de niveau du signal radio, les interférences et le bruit, ainsi que le nombre de stations actives sur un même canal radio (i.e. charge). Ceux-ci représentent des paramètres qui ont un poids important sur la détermination du débit utile et donc du temps de transmission des données (cf. II.2.2.4). Afin de diminuer la consommation d'énergie des terminaux mobiles dans cet environnement, il est souhaitable de concevoir une solution qui tient compte de l'ensemble de ces paramètres dans la prise de décision concernant l'ordonnancement des paquets. Néanmoins, le respect de la qualité de service des applications actives doit rester le premier objectif à respecter dans la sélection d'interfaces et l'ordonnancement.

Nous considérons ici un environnement de réseaux sans fil hétérogène, composé d'au moins deux technologies (e.g. 3G et WiFi) et où des utilisateurs évoluent en mobilité et avec des services actifs nécessitant l'échange de données sous forme de paquets. La notation suivante sera utilisée pour la suite du chapitre :

- $M$ : nombre d'interfaces réseaux disponibles sur le terminal. Ce nombre est un paramètre dynamique régulièrement mis à jour en fonction de la disponibilité des réseaux dans l'environnement du terminal. Un réseau radio est considéré comme disponible lorsque le niveau de signal de ce dernier est considéré acceptable par la couche PHY.

- $N$ : nombre de flux applicatifs sur le terminal. Chaque flux étant caractérisé par son niveau de QoS requise.
- Pour chaque classe de flux  $j$  la QoS exigée est notée  $QoS_{th}(j)$
- Pour chaque interface  $i$  la QoS offerte est notée  $QoS(i)$
- Pour chaque option d'association paquet/interface le coût énergétique estimé est noté  $E_{ij}$ .

A chaque cycle, le mécanisme d'ordonnancement des paquets doit répondre à la question suivante : quel paquet doit être envoyé et sur quelle interface?

A notre sens, le mécanisme d'ordonnancement doit satisfaire les deux critères énumérés ci-dessous par ordre décroissant d'importance:

- Critère 1 : Vérifier que la QoS pouvant être assurée par une interface cible est supérieure ou égale à un seuil défini pour la classe d'application dont est issu le paquet.
- Critère 2 : S'assurer que le coût énergétique de l'envoi d'un paquet via une interface est inférieur à ceux des autres interfaces afin de maximiser la durée de la batterie.

Pour un paquet  $k$ , l'interface choisie est  $n$  tel que:

$$QoS(n) > QoS_{th}(j) \text{ et } E_{nk} = \min_j(E_{jk}), j \in [1, M]$$

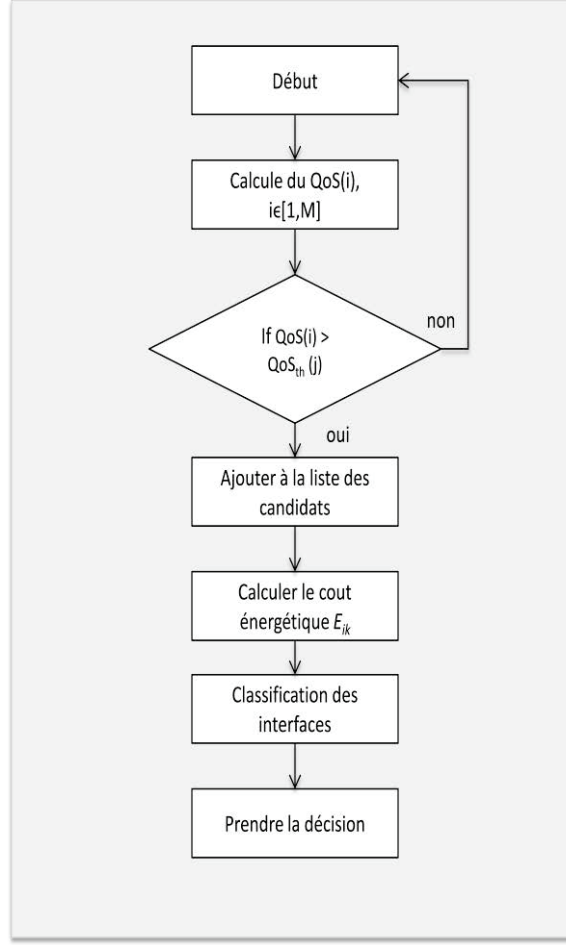


Figure 8: Algorithme d'ordonnancement éco-énergétique

L'algorithme d'ordonnancement proposé est présenté sur la Figure 8. Pour chaque flux, le mécanisme d'ordonnancement vérifie s'il est possible de garantir le niveau de QoS minimum correspondant au flux auquel appartient le paquet. Cette première étape permet d'identifier les interfaces réseaux candidates. Ensuite, les coûts énergétiques de ces interfaces candidates sont estimés. Pour chacune de ces interfaces, les réseaux disponibles sont classés selon leurs coûts énergétiques. Le réseau ayant le coût le plus faible est sélectionné pour chaque type de technologie. Enfin, la technologie la plus éco-énergétique est choisie pour la transmission des paquets.

La QoS est calculée en se basant sur le modèle proposé par [66].

$QoS(i)$  représente la qualité de service offerte par le réseau  $i$  au flux  $j$ . Elle tient compte d'un ensemble de paramètre dont la bande passante, le délai, le taux d'erreur binaire et la gigue. Elle est exprimée par :

$$QoS(i) = W_{ber}(j).ber(i) + W_J(j).J(i) + W_{Bwd}(j).Bwd(i) + W_d(j).d(i)$$

Où

- $J(i)$  est la gigue mesurée sur le réseau  $i$
- $ber(i)$  est le taux d'erreur binaire mesuré sur le réseau  $i$
- $Bwd(i)$  est la bande passante disponible sur le réseau  $i$
- $d(i)$  est le délai mesuré sur le réseau  $i$

L'importance de ces paramètres dépend de l'application en cours et est exprimée par des poids (i.e.  $W_{ber}$ ,  $W_J$ ,  $W_{Bwd}$ ,  $W_d$ ) qui sont calculés en utilisant Analytic Hierarchy Process (AHP) [76].

Le niveau de QoS minimale requis par le flux  $j$  est exprimé par :

$$QoS_{th}(j) = W_{ber}(j) \cdot ber_{th}(j) + W_J(j) \cdot J_{th}(j) + W_{Bwd}(j) \cdot Bwd_{th}(j) + W_d(j) \cdot d_{th}(j)$$

Où

- $ber_{th}(j)$  représente le seuil requis sur le taux d'erreurs binaires
- $J_{th}(j)$  représente le seuil requis sur la gigue
- $Bwd_{th}(j)$  représente le seuil requis sur la bande passante
- $d_{th}(j)$  représente le seuil requis sur de délai

Dans ce mécanisme il est aussi nécessaire d'avoir une estimation du coût énergétique pour l'utilisation de chacune des interfaces. Nous présentons dans la section suivante une analyse des métriques pouvant être utilisées dans ce sens et que l'on appliquera pour compléter puis évaluer notre proposition.

### III.3.1 Métriques énergétiques et modèle de consommation d'énergie

Plusieurs paramètres peuvent impacter la quantité d'énergie nécessaires pour la transmission d'un paquet. L'approche la plus simple est d'estimer le temps nécessaire pour transmettre le paquet puis de multiplier ce temps par la puissance de transmission utilisée par le dispositif radio de la technologie considérée. Si la taille des paquets varie selon le type d'application, il dépend également de la technologie utilisée (entête, taille des blocs radio, ...). Le temps passé pour transmettre un paquet dépend également des conditions canal qui varient, entre autres, en fonction de la distance de l'utilisateur par rapport à la station de base et des obstacles entre l'émetteur et le récepteur. Par ailleurs, le débit disponible pour chaque terminal dépend pour certaines technologies du nombre de terminaux utilisant le même canal (partage de la bande passante, collisions et interférences).

Nous considérons dans la suite le cas des deux technologies : IEEE 802.11 et 3GPP LTE.

### Cas de IEEE 802.11

Pour la norme IEEE 802.11, nous considérons le modèle énergétique proposé dans [27] et résumé dans la section II.2.2.1. Ce modèle estime la consommation d'énergie pour les différents états d'une interface WiFi 802.11n avec le mécanisme DCF.

Rappelons que la procédure de transmission d'une trame se fait par la méthode d'accès DCF, basée sur la technique CSMA/CA.

Le modèle estime la consommation d'énergie pour les durées de silence entre les trames (DIFS, SIFS) pour les périodes de Backoff, et pour l'état de transmission : émission et réception. Le modèle estime également l'énergie due aux collisions et aux retransmissions.

Ainsi, l'énergie totale pour la transmission d'un paquet est exprimée par :

$$E = E_{DIFS} + E_{SIFS} + E_{Backoff} + E_{Collision} + E_{Trans} + E_{Recep}$$

Où  $E_{DIFS}$ ,  $E_{SIFS}$ ,  $E_{Backoff}$ ,  $E_{Collision}$ ,  $E_{Trans}$  et  $E_{Recep}$  sont les valeurs énergétiques durant les silences inter trames (DIFS et SIFS), le Backoff, la collision, la transmission et la réception des paquets. Ce modèle est basé sur le nombre de stations actives sur le canal, ainsi, il reflète l'effet des conditions de canal sur la consommation d'énergie de l'interface radio WiFi.

### Cas de 3GPP LTE

Concernant les normes 3GPP, il existe peu de modèle dans la littérature tenant compte du trafic et des caractéristiques des flux de données. Nous proposons donc notre propre modèle énergétique pour les transmissions sur l'interface cellulaire LTE d'un terminal mobile. Celui-ci dépend du nombre de stations sur le même canal.

Nous considérons un réseau cellulaire LTE avec SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) [77] en tant que technique d'accès pour les canaux de liaison montante. Dans ce cas, l'allocation de ressources se fait en temps et en fréquence, par blocs de ressources physiques PRB (*Physical Resource Block*) composé chacun de 12 sous-porteuses adjacentes avec 7 symboles SC-FDMA (c.f. Figure 9). Notons que sur la voie descendante la norme 3GPP utilise la technique d'accès OFDMA. Chaque TTI (*Transmission Time Interval*), d'une durée de 1ms (deux slots), l'eNodeB alloue un certain nombre de PRBs par utilisateur en fonction de ses besoins et des ressources disponibles.

Le modèle énergétique que nous proposons considère la disponibilité d'informations inter-couches et tient compte de plusieurs paramètres des couches MAC et PHY que nous détaillerons dans la suite.

Ainsi, le coût énergétique pour l'envoi d'un paquet peut être exprimé par:

$$E_{LTE} = P_{LTE} \cdot t$$

Où :

- $t$  est le temps nécessaire pour envoyer un paquet
- $P_{LTE}$  est la puissance en voie montante normalisée par la norme 3GPP [78] et exprimée par:

$$P_{LTE} = \min\{P_{MAX}, P_0 + 10 \log_{10} N + \alpha PL_t + \delta_{mcs} + f(\Delta_i)\}$$

Avec :

- $P_{MAX}$  désigne la puissance d'émission maximale qui dépend de la classe de puissance du terminal mobile (TM).
- $N$  est le nombre de blocs de ressources physiques (PRB) alloués au terminal
- $PL$  est l'affaiblissement ou pertes de propagation (Pathloss) mesuré par l'utilisateur
- $\alpha$  et  $P_0$  sont des paramètres de cellule diffusés de l'eNodeB au TM
- $\delta_{mcs}$  est un paramètre spécifique lié à la modulation et au schéma du codage (MCS) et qui est pris en compte dans le cas où, à la demande du eNodeB, l'utilisateur doit ajuster sa puissance en se basant sur le MCS.
- $f(\Delta_i)$  est une correction de puissance effectuée par l'utilisateur en fonction des informations envoyées par l'eNodeB.

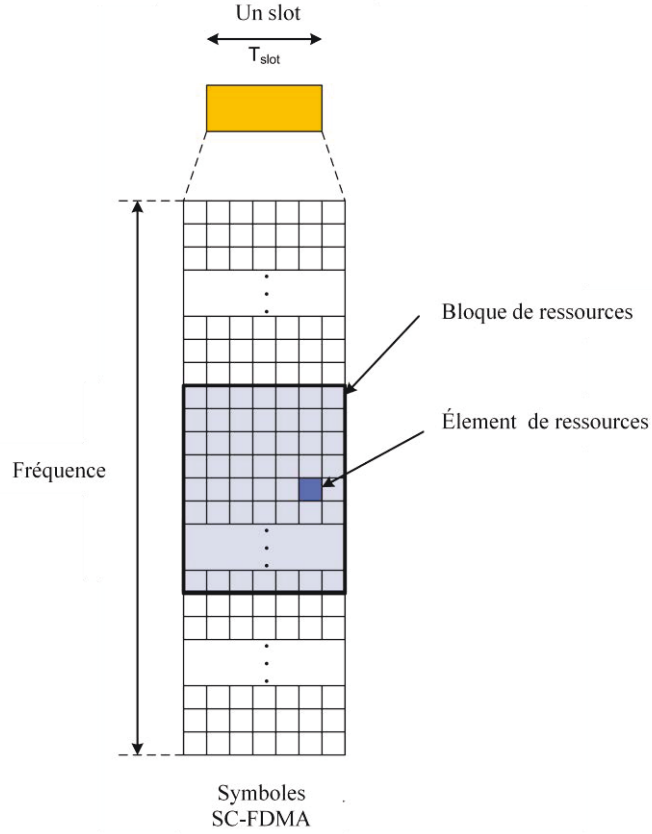


Figure 9: Grille de ressources pour la voie montante [77]

Pour chaque utilisateur, l'allocation minimale durant une sous-trame (1ms) est de deux PRB avec 1 PRB sur chaque slot. Assumons que pour une bande passante donnée, le nombre total de PRB est égal à  $P$ . L'ordonnancement des paquets par les eNodeBs se base sur l'algorithme « Round Robin » : le partage des ressources se fait d'une manière équitable entre tous les utilisateurs. Si nous considérons  $M$  utilisateurs dans le système, chaque TM aura en moyenne un nombre de PRB équivalent à :

$$\frac{P}{M}$$

Comme chaque PRB est composé de 12 sous-porteuses de 7 symboles SC-FDMA, un total de 84 symboles de modulation est ainsi attribué à chaque utilisateur. Si  $S$  est le nombre de bits par symbole (e.g. 6 bits dans le cas d'une modulation QAM 64), le nombre de bits pouvant être transmis sur une durée de 1ms est donnée par :

$$\left(\frac{P}{M}\right) \cdot 84 \cdot S \text{ (bits)}$$

Par conséquent, le nombre de paquets pouvant être transmis pendant 1ms est donnée par :

$$n = \frac{\left(\frac{P}{M}\right) \cdot 84 \cdot S}{k}$$



Où  $k$  désigne la taille du paquet en bits. Ainsi, le temps nécessaire pour l'envoi d'un paquet par un utilisateur donné lorsque  $M$  utilisateurs sont simultanément actifs sur le même canal peut être exprimé par :

$$t = \frac{1 \text{ ms}}{n} = \frac{k}{\left(\frac{P}{M}\right) \cdot 84 \cdot S} \text{ (ms)}$$

Dans ces conditions, l'énergie consommée pour envoyer un paquet avec la technologie LTE peut être estimé par :

$$E_{LTE} = P_{LTE} \cdot \frac{k}{\left(\frac{P}{M}\right) \cdot 84 \cdot S} \text{ (W.ms)}$$

Ainsi, le nombre de blocs de ressources alloués et la modulation utilisée déterminent la quantité de données utiles qui peut être transmise durant un intervalle de temps de transmission (TTI). Ces deux paramètres dépendent de la qualité du canal et de la technique d'allocation de ressource adoptée.

### III.3.2 Simulation et Evaluation de Performances

Dans cette section nous évaluons la consommation d'énergie d'un TM sur lequel serait implémenté l'algorithme d'ordonnancement de paquet proposé plus haut. Nous considérons un environnement de réseaux sans fil hétérogènes avec coexistence de deux types de réseaux (les réseaux cellulaires (LTE) et les réseaux WLAN (802.11n)).

L'algorithme d'ordonnancement devient alors :

---

**EAS algorithm :**


---

```

0 Begin : The mobile checks for available networks ANs with  $RSS > RSS_{th}$ 
1: if AN exist then
1:   check if  $QoS > QoS_{th}$ 
2:   if QoS is respected then
2:     Classify the candidate ANs based on their energy cost and
       select the minimum energy cost per interface type
3:   if  $minE_{802.11n} < minE_{LTE}$  then
3:     Send packet over WiFi interface
4:   else
4:     Send packet over LTE interface
5:   end if
6:   end if
7: end if

```

---

Avec :

- $RSS_{th}$  est le seuil qui représente la valeur minimale du signal reçu en dessous de laquelle un réseau n'est pas considéré comme candidat.
- $QoS_{th}$  est la qualité de service minimale à respecter. Cette valeur dépend du type de l'application et est calculée selon la formule décrite dans la section précédente.
- $minE_{802.11n}$  et  $minE_{LTE}$  sont respectivement les coûts énergétiques minimaux des réseaux WiFi et des réseaux LTE disponibles.

Les simulations ont été réalisées sous MATLAB. L'évaluation a été effectuée pour une zone géographique urbaine de 1000 m<sup>2</sup>, où un certain nombre de eNodeBs et de points d'accès wifi sont déployés. Le nombre de points d'accès wifi sera varié durant les simulations afin d'évaluer l'algorithme pour des niveaux de couverture wifi différents.

Pour chaque station, deux sous-zones différentes sont définies: une zone centrale et une zone de bordure.

Plusieurs terminaux multi-homés sont en mobilité sur la zone considérée selon le modèle de mobilité Gauss Markov[79]. Les pertes de propagation pour la norme 3GPP LTE sont calculées en utilisant le modèle de propagation COST-Hata [80] qui s'applique pour les zones urbaines avec des fréquences allant jusqu'à 2000 MHz [81].

Le Tableau 8 détaille les différents paramètres considérés dans nos simulations :

Technologie	Paramètres	Valeurs
IEEE 802.11n	Durée du Slot	9 $\mu$ s
	DIFS	34 $\mu$ s
	SIFS	16 $\mu$ s
	$CW_{min}$	15
	$CW_{max}$	1023
	Nombre de stations actives (terminaux)	Variable: [2,10, 20, 30, 40, 50]
3GPP LTE	Bande passante	20 MHz
	Nombre de PRB	100
	Bande de fréquence par PRB	180 KHz
	Puissance maximale de transmission $P_{max}$	500mW (27dBm)
	Facteur de compensation de pathloss $\alpha$	0.6
	$P_0$	-54.5dBm

	TTI Nombre de stations actives (terminaux) Modulation	1 ms (2 slots) Variable : [10, 20, 30,40] QPSK, 16QAM, 64QAM
Topologie du réseau	Nombre d'eNodeB Nombre de point d'accès WiFi	4 Variable

Tableau 8: Paramètres de simulation

Les performances de l'algorithme proposé sont comparées à ceux d'un algorithme de référence basé sur la puissance du signal reçu (RRS), comme unique métrique utilisée pour la sélection des interfaces.

Le modèle de consommation d'énergie pour l'interface LTE a été évalué en faisant varier le nombre de stations actives sur le canal, ainsi que les distances qui séparent les terminaux mobiles du eNodeB.

Comme le montre la Figure 10, nous pouvons constater que l'énergie de transmission du TM atteint un maximum quand le réseau est saturé et que le TM se trouve éloigné de l'eNodeB. Ceci peut s'expliquer par le fait que d'une part lorsque l'utilisateur s'éloigne de son eNodeB, les pertes de propagation (Pathloss) augmentent, forçant le terminal mobile à augmenter sa puissance d'émission jusqu'à ce qu'il atteigne la puissance d'émission maximale définie par la norme pour la classe de puissance du mobile. D'autre part, lorsque le nombre de stations actives dans une cellule augmente, le temps de transmission d'un paquet augmente également puisque les ressources disponibles sont distribuées équitablement entre les terminaux actifs, selon l'ordonnanceur UL Round Robin, augmentant ainsi le temps nécessaire pour transmettre la même quantité de données.

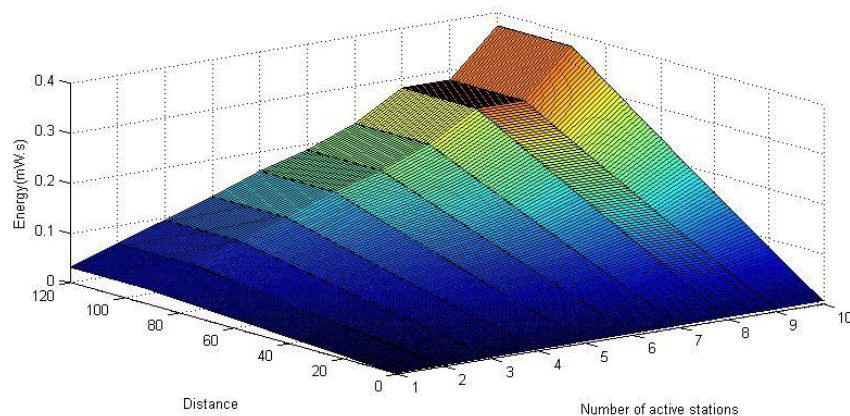


Figure 10: Consommation d'énergie pour l'interface radio LTE

La Figure 11 montre une comparaison des performances de l'algorithme proposé par rapport à un algorithme de référence basé sur le niveau du signal reçu (RRS).

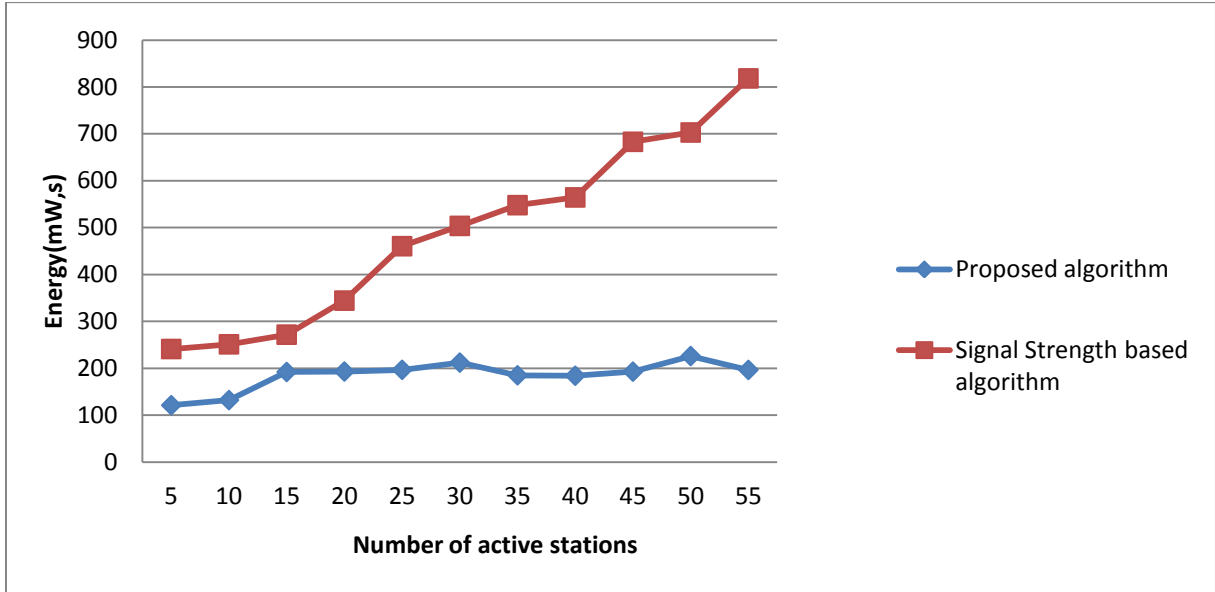


Figure 11: Consommation d'énergie cumulée

Comme on peut le constater, notre proposition conduit à une économie d'énergie importante par rapport à l'algorithme de référence. Ce gain est d'autant plus important que les réseaux sont chargés (en termes de nombre d'utilisateurs et de trafic).

L'analyse des résultats montre que lorsque le terminal mobile passe à travers une zone de couverture IEEE 802.11, ayant un nombre de stations actives relativement élevé, l'algorithme d'ordonnancement que nous proposons peut décider de garder le terminal connecté au réseau LTE, même si la puissance du signal reçu du réseau WiFi est plus élevée. Cela conduit à un gain important en termes de consommation d'énergie puisque au même moment, le mécanisme du Backoff utilisé dans la technique CSMA du réseau WiFi est très sensible au nombre de stations en compétition.

Nous avons ensuite fait varier le nombre de stations actives entre 5 et 50 pour chaque réseau WiFi, et le niveau de couverture des réseaux WiFi entre 15% et 50% de la surface totale de la zone considérée.

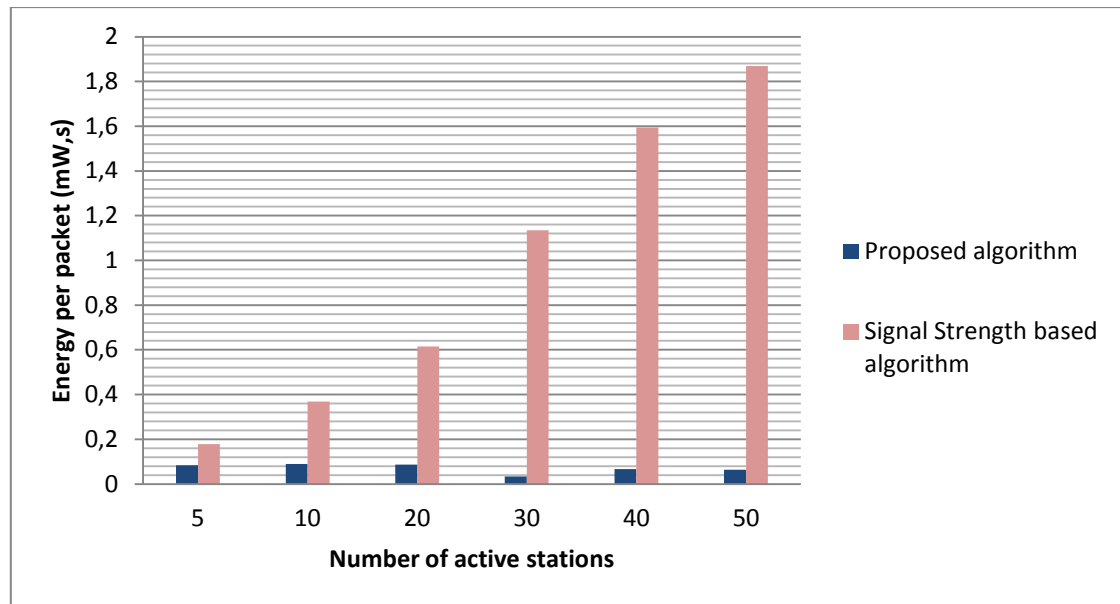


Figure 12: Energie inutile de l'interface WiFi (couverture totale de 15%)

Sur les Figure 12 et 13 nous constatons que lorsque le nombre de terminaux actifs augmente, l'énergie consommée par les procédures d'overhead (composées de DIFS, des collisions et du Backoff) est très sensiblement affectée. En effet, lorsque le nombre de stations sur le canal augmente pour les réseaux de la norme 802.11n, la concurrence sur le canal augmente entre les terminaux pour l'accès au medium et par conséquent le temps passé à écouter le canal ainsi que les probabilités de collision et de retransmission augmentent.

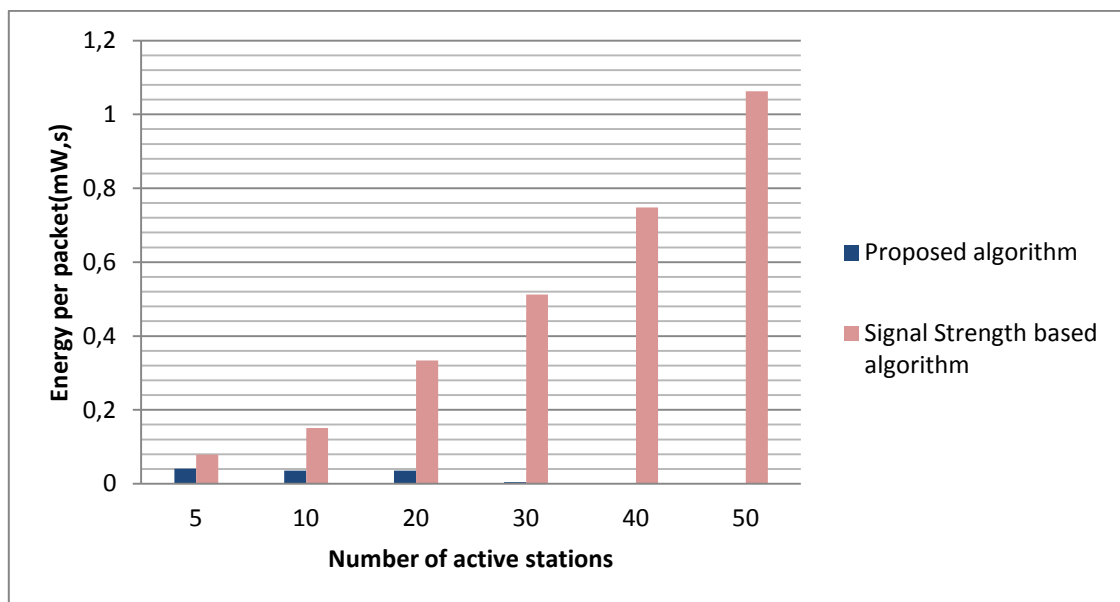


Figure 13: Energie inutile de l'interface WiFi (couverture totale de 50%)

### III.4 Conclusions

L'évolution et la diversité des technologies sans fil (e.g. Wifi, WIMAX, 3G, LTE..) ainsi que l'évolution des appareils mobiles, devenus aujourd'hui multimodaux peuvent avoir un impact important sur la consommation d'énergie sur les terminaux des utilisateurs. En effet, sans des mécanismes appropriés, l'utilisation simultanée de plusieurs interfaces sans fil peut avoir un impact défavorable sur l'efficacité énergétique (durée de vie des batteries et empreinte carbone). Dans ce chapitre nous avons commencé par présenter les principales solutions d'ordonnancement existantes dans la littérature. Ensuite, nous avons présenté les modèles énergétiques existants pour les interfaces radio et nous avons proposé un modèle énergétique pour la norme 3GPP LTE. Basés sur ces modèles, nous avons proposé un algorithme d'ordonnancement des paquets pour la réduction de la consommation d'énergie des terminaux multimodaux. La solution proposée consiste à associer des critères sur la consommation d'énergie à ceux de QoS traditionnellement utilisés par les approches standards.

Les résultats obtenus montrent qu'une diminution importante de la consommation d'énergie sur les terminaux mobiles peut être réalisée en utilisant notre approche. De plus, dans le cas où les réseaux wifi sont chargés, une réduction considérable de l'énergie consommée pour des opérations d'overhead (écoute du canal, collision) peut être réalisée. Ceci s'explique par le fait que l'algorithme que nous proposons planifie les paquets sur l'interface la moins consommatrice d'énergie en fonction des conditions ambiantes (état du canal, QoS et charge).

Nous constatons également qu'il ne faut pas négliger l'énergie consommée dans les différents états des interfaces radio, y compris les états de veille, ainsi que les différentes procédures annexes tel que le scan et l'association. Une intelligence sur le terminal permettrait d'optimiser sa consommation en gérant de manière plus efficace l'ensemble de ses interfaces en les activant/désactivant/utilisant en fonction du contexte. Ceci nécessitera l'évolution des architectures et des mécanismes de coopération et d'intelligence permettant de récupérer le contexte de l'utilisateur. C'est ce que nous proposons de traiter dans le chapitre suivant.



## **IV. Contribution 2 : Gestion et sélection d'interfaces sur des environnements de réseaux d'accès sans fil hétérogènes**

### **IV.1 Introduction**

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié la problématique de l'ordonnancement des paquets dans un contexte de coexistence de réseaux d'accès hétérogènes. Nous avons alors supposé que l'ensemble des interfaces étaient disponibles et actives sur le terminal de l'utilisateur. Or, il s'avère, comme l'ont montré les résultats des études précédentes (cf. Section II.2.2), que pour certaines interfaces réseau, la consommation d'énergie dans les états autres que celui de transmission, est loin d'être négligeable.

De façon générale, la gestion des interfaces radio comprend deux fonctionnalités essentielles :

- L'optimisation de l'utilisation des interfaces quand elles sont dans l'état actif. Ceci inclut la sélection des interfaces de manière optimale pour chacun des flux de données en cours et le paramétrage des différentes fonctionnalités du réseau (modulation, codage, puissance, paramètres mac, ...).
- La gestion proprement dite des interfaces, c-à-d optimiser leurs activations, leurs mises en veille et leurs désactivations.

En effet, pour chaque interface, un driver spécifique gère son activité et décide de la placer dans un des différents états possibles (définis par les standards).

On représente souvent l'état des interfaces par une machine à état qui définit les différentes transitions et les conditions qui leurs sont associées.



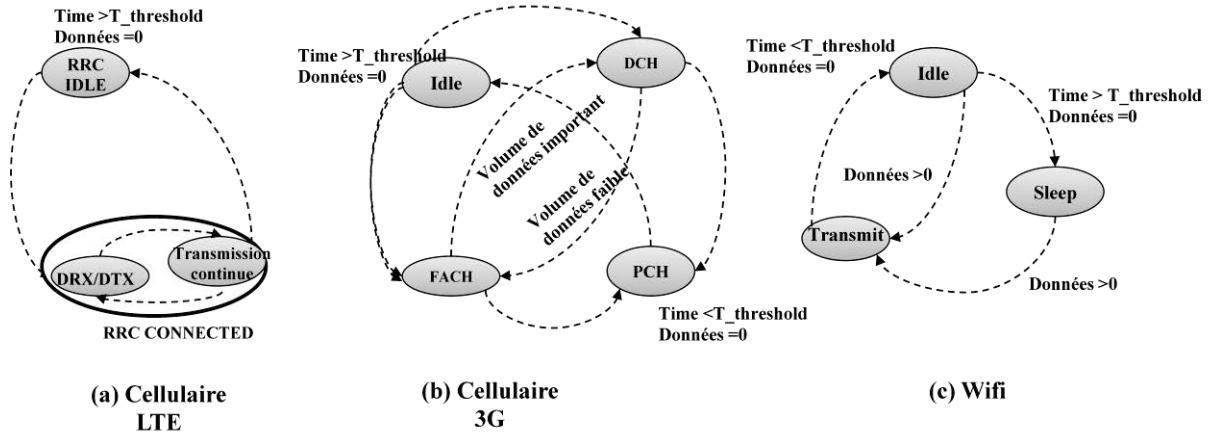


Figure 14: Machines à état des interfaces cellulaires et WiFi

Les transitions entre les états sont décidées en fonction d'événements et de temporisateurs (*timers*) visant à préparer l'interface à transmettre ou à recevoir des paquets ou la mettant en veille après une période d'inactivité prédéterminée. Une description détaillée de ces états et des transitions est présentée à la section II.2.

Jusqu'ici, les différents drivers gérant les interfaces d'un terminal mobile fonctionnent de manière indépendante les uns des autres. Il n'existe pas encore de solutions de coordination permettant de synchroniser leur fonctionnement pour une optimisation globale. Or, dans le cadre de la maîtrise des consommations énergétiques, et comme montré dans le chapitre précédent, il semble qu'un raisonnement global et par anticipation est nécessaire pour gérer au mieux l'ensemble des interfaces disponibles. C'est la problématique que nous nous proposons d'étudier dans ce chapitre afin de proposer une solution unique combinant les deux aspects : gestion et utilisation.

Pour atteindre ces objectifs, la connaissance de l'ensemble des critères qui touchent ces deux aspects semble nécessaire. L'accès à des informations de contexte locales et globales nécessitera certainement des évolutions architecturales. De plus, des algorithmes de décision multicritères seraient complexes, ce qui peut engendrer un effet opposé à celui souhaité en augmentant la consommation énergétique.

Basculer un flux de données d'une interface à une autre est souvent désigné par mobilité verticale « Vertical Handover » dont l'objectif initial est de maximiser la QoS. Généralement, on bascule tous les flux d'un utilisateur sur la technologie la plus propice à un instant donné (e.g. de la 3G vers le WiFi qui offrent plus de débit). Certains opérateurs utilisent déjà cette même technique pour faire de l'offloading, c-a-d pour décharger un réseau cellulaire en basculant certaines connexions sur un réseau d'accès local de type WiFi ou sur une Femto installées au domicile de l'utilisateur. Ceci peut avoir plusieurs avantages aussi bien pour l'utilisateur que pour l'opérateur :

- Offrir une meilleure connexion à l'utilisateur indoor : en effet, les signaux des réseaux cellulaires, provenant d'antennes placées à l'extérieur peuvent être de mauvaise qualité à l'intérieur des bâtiments. L'utilisation d'antennes indoor permet d'améliorer l'expérience de l'utilisateur.
- Décharger les réseaux cellulaires d'un maximum de trafic. En effet, l'utilisation de terminaux mobiles en indoor est en pleine expansion. Les flux échangés quand l'utilisateur est à *domicile ou au bureau sont souvent plus importants en nombre et en volume, comparés à ceux* échangés en situation de mobilité outdoor. Dans ces cas, l'utilisation de micro cellules de type Femto ou de la technologie WiFi permet de décharger les réseaux cellulaires et de préserver leurs ressources aux usagers en extérieur et/ou en situation de mobilité réelle.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons notre solution de gestion d'interfaces ainsi que les résultats de l'évaluation.

## **IV.2 ECOWISM : une solution de gestion d'interfaces minimisant la consommation d'énergie sur les terminaux mobiles**

Nous considérons ici un terminal mobile  $i$  ayant  $n_i$  interfaces radio et  $s_i$  services ou flux de donnée simultanés, nous cherchons à trouver les combinaisons « idéales » permettant l'association de ces flux de données sur les différentes interfaces de sorte que :

- La QoS soit garantie pour tous les flux
- La consommation d'énergie soit minimale sur l'ensemble des interfaces du terminal

Il ne s'agit donc pas de basculer tous les flux d'un terminal d'une interface vers une autre (handover vertical), mais de trouver la combinaison optimale de distribution des divers flux sur les interfaces disponibles. Une approche globale combinant l'affectation des flux (scheduling) et la gestion d'interfaces (i.e. activation et désactivation) nous semble intéressante à explorer.

Dans la suite, nous détaillons la solution que nous proposons à travers des contributions sur les trois axes suivants:

- Axe Métriques de décision
- Axe Méthodes de décision
- Axe Solution architecturale

### **IV.2.1 Axe 1 : Métriques de décision**

La gestion des interfaces exige une connaissance globale sur l'ensemble des entités du système qui peuvent impacter les décisions. Dans la section III.2.1, nous avons présenté et énuméré les différents critères de décision pour la sélection d'interface, liés aux différents acteurs d'un système de réseaux hétérogènes, à savoir les informations liées aux utilisateurs, aux terminaux mobiles, aux applications ainsi que celles liées aux interfaces d'accès et aux réseaux associés.

Pour chaque terminal :

- Liste des flux actifs, leurs caractéristiques et leurs contraintes en termes de QoS
- Modèle de mobilité
- Etat de la batterie, en charge ou non
- Liste des interfaces réseau disponibles

Pour chaque interface radio

- Etat de l'interface : active, en transmission, veille, etc.
- Liste des réseaux disponibles et leurs conditions canal (BER, SNR)

Pour chaque réseau

- Technologie
- Charge de la cellule ou du réseau

Pour chaque utilisateur

- Profil et préférences

La collecte de ces informations de contexte, constitue une tâche importante dans le processus de décision.

En ce qui concerne les métriques liées à la consommation d'énergie, il existe dans la littérature plusieurs travaux proposant des modèles énergétiques pour les interfaces radio (détaillés dans la section II.2.2). Nous retenons ici celui décrit dans [38] qui propose, pour chaque technologie, une métrique simplifiée basée sur la taille des données. Le tableau suivant résume ce modèle et l'étend pour les volumes de données supérieurs à 500 KB.

Taille des données x (KB)	$x \in [1 - 4]$	$x \in [4 - 10]$	$x \in [10 - 50]$	$x \in [50 - 100]$	$x \in [100 - 500]$	$x \in [500 - 1000]$	$x \in [1000 - 5000]$
3G	$0.166x + 12.33$	$0.05x + 12.8$	$0.032x + 12.87$	$0.01x + 14$	$0.0125x + 13.7$	$0.036x + 2$	$0.005x + 30$
EDGE	$0.066x + 3.73$	$0.083x + 3.66$	$0.037x + 4.12$	$0.06x + 3.0$	$0.027x + 6.25$	-	-
WiFi	$0.033x + 1.86$	$0.083x + 2.16$	$0.01x + 2.4$	$0.002x + 2.8$	$0.005x + 2.5$	$0.004x + 8$	$0.005x + 6.25$
WiFi+(scanning/association)	$0.033x + 6.96$	$0.083x + 6.66$	$0.01x + 7.4$	$0.002x + 7.8$	$0.005x + 7.5$	$0.004x + 13$	$0.005x + 11.25$

Tableau 9: Consommation d'énergie en fonction de la taille des données pour différents interfaces

L'analyse de ce modèle nous permet de faire plusieurs constatations et d'extraire plusieurs règles:

- Pour les faibles quantités de données, les interfaces EDGE consomment moins d'énergie que les interfaces WiFi et 3G.
- Pour de grandes quantités de données, les interfaces WiFi consomment moins d'énergie que les autres interfaces.
- L'utilisation du WiFi n'est pas optimale pour les trafics de petits volumes si le terminal n'est pas déjà associé à un point d'accès.
- Lorsqu'on considère des scénarios plus complexes, par exemple deux ou plusieurs services actifs en même temps, le processus de sélection devrait considérer la consommation d'énergie des interfaces avec l'ensemble combiné des services.

#### IV.2.2 Axe 2 : Méthodologie de décision pour la gestion et la sélection d'interfaces

Si on considère des interfaces actives, la sélection de l'une d'entre elles pour un flux de données constitue un challenge important vu la diversité des paramètres qui peuvent être considérés pour cette décision. Dans la littérature, plusieurs techniques d'optimisation multicritères de sélection d'interfaces ont été proposées. Nous pouvons les classer en cinq grandes familles selon les approches d'optimisation considérées:

- **Approches par la fonction d'utilité :** La fonction d'utilité est un moyen de mesurer l'opportunité de différents types de biens ou de services, et le degré de profit fournit par ces produits pour les consommateurs. Par exemple, des facteurs tels que la satisfaction de l'utilisateur et la facilité d'utilisation sont considérées comme essentielles à l'évaluation précise de l'utilité d'un produit ou d'un service. Cette mesure est normalement présentée sous la forme d'une expression mathématique, et peut être utilisée avec n'importe quel type de bien ou service utilisé par un consommateur.
- **Approches par la fonction de coût :** Elles se basent sur une formulation mathématique pour la prédiction du coût associé à un service ou à un produit. Les entreprises utilisent les fonctions de coût pour prévoir les dépenses associées à la production, afin de déterminer quelles sont les stratégies de prix à utiliser pour réaliser les marges bénéficiaires souhaitées. Dans le cadre des réseaux sans fil, ce coût peut exprimer par exemple le coût en termes de QoS, le coût monétaire ou le coût énergétique.
- **Approche par Politique/Stratégies :** Elles sont basées sur un ensemble de règles définies en fonctions de l'objectif du décideur. Ces règles aident à prendre une décision qui n'est pas forcément optimale, mais qui reste la meilleure décision possible à cause de l'indisponibilité de toutes les informations. Parmi les outils qui peuvent être utilisés on peut citer les techniques d'inférence et la logique floue.
- **Approches par la théorie des jeux :** Il s'agit de générer le choix idéal par un jeu de stratégie. Il existe deux principales branches de la théorie des jeux: les jeux coopératifs et les jeux non coopératifs. Dans le cadre des réseaux sans fil, la théorie des jeux a été utilisée pour résoudre plusieurs problèmes liés par exemple au contrôle de puissance, à la sécurité, au contrôle de flux et à l'allocation de ressources.
- **Approches MADM (Multi-Attribute Decision Making) :** Elles sont basées sur une sous-discipline de la recherche opérationnelle permettant de résoudre des problèmes décisionnels multi-critères. Dans la littérature, on retrouve plusieurs méthodes basées sur cette approche telle que les méthodes SAW, TOPSIS, AHP, MEW, GRA, ELECTRE.

Plusieurs travaux ont abordé la conservation d'énergie pour la sélection des interfaces. La plupart des travaux traitaient cette problématique dans le cadre du handover vertical et peu de travaux se sont intéressés à l'association multi-flux/interfaces. Parmi les travaux dédiés à la conservation d'énergie dans le cadre du handover vertical, les auteurs dans [43] ont proposé un algorithme de sélection d'interfaces utilisant des fonctions de coût énergétique. Dans [41] les auteurs ont proposé une solution de sélection d'interface pour le handover vertical minimisant la consommation d'énergie, basée sur la logique floue. Dans [82], un mécanisme de sélection d'interface et de réseau basé sur MADM a été

proposé. Parmi les critères de décision, ils ont considéré la consommation de puissance des utilisateurs. Ils ont utilisé les algorithmes SAW, MEW, GRA, TOPSIS et ELECTRE pour le classement des interfaces et des réseaux.

Il existe peu de travaux concernant la sélection d'interface dans le cas de multi-flux. Dans [83], les auteurs ont proposé une solution de sélection d'interface basée sur la théorie des jeux. Ils ont utilisé le jeu évolutionnaire pour atteindre les équilibres de Nash qui tient en considération la consommation énergétique du terminal mobile dans le cadre de l'association multi-flux/interface. Ils ont considéré un environnement multi modes et trois types de technologies radio (802.11b, 802.11a et WiMAX 802.16a).

### **IV.2.3 Gestion d'interfaces**

La gestion des interfaces des terminaux mobiles multi-homés est apparue pour répondre à un besoin lié à la capacité énergétique limitée des équipements mobiles qui provient du fait que même durant les périodes d'inactivité, les interfaces radio continuent à consommer une quantité d'énergie non négligeable. Plusieurs travaux (cf. II.2.3.2) se sont intéressés à cette problématique et ont principalement proposé des solutions limitant le temps d'inactivité des interfaces afin d'augmenter les durées de vie des batteries des Terminaux Mobiles.

La plupart de ces travaux traitent pratiquement un seul aspect de la consommation d'énergie sur les terminaux mobiles, à savoir l'énergie consommée pendant les périodes d'inactivité. Souvent, c'est le réseau cellulaire qui est utilisé pour réveiller (wake up) l'interface wifi en cas de présence d'un trafic de données important ou des flux de données exigeants en termes de QoS. Dans ces études, on considère que l'utilisation de l'interface Wifi est toujours la meilleure solution dans les conditions décrites. Or, ceci n'est pas toujours vrai dans le cas de la présence de trafics de données différents, avec des contraintes de QoS particulières comme la voix ou la vidéo. La décision d'activer ou de choisir telle ou telle interface pour un type de trafic donné est en réalité plus complexe.

D'autres travaux ont proposé des solutions de gestion d'interfaces offrant une optimisation plus globale. Dans [44], les auteurs ont proposé une plateforme de gestion des interfaces radio qui comporte les modules suivants :

- La collecte des informations (énergie et QoS)
- Stockage des informations
- Découverte des réseaux disponibles
- Price de décision

L'inconvénient de ce type de solution est le coût énergétique élevé des calculs effectués par le terminal mobile. En effet, l'analyse et la prise de décision en utilisant des algorithmes d'apprentissage complexes peuvent augmenter la consommation d'énergie des terminaux mobiles vu qu'ils possèdent des capacités de calcul limitées. Afin de faire face à ce problème, déléguer ces tâches d'analyse et de prise de décision en partie ou en totalité semble être la meilleure solution possible. C'est ce que nous tenterons de démontrer dans la solution que nous proposons dans ce chapitre.

#### **IV.2.4 Axe 3 : Solutions architecturales et optimisation**

L'optimisation de la consommation globale d'énergie passe par la minimisation de la consommation d'énergie dans les différents états de l'interface : état d'inactivité (veille) et état d'activité (transmission). Le mécanisme proposé est composé de quatre modules :

- Module de gestion de session (*Session Monitoring Process*): L'objectif de ce module est de minimiser le coût de l'énergie au repos (en mode veille).
- Module de gestion de services (*Service Monitoring Process*): Ce module est responsable de l'optimisation du coût de l'énergie de transmission en se basant sur les informations des interfaces radio et celles des flux de données.
- Collecteur d'information (*User Work Profile Gathering Process*): ce module est responsable de la collecte des informations de l'utilisateur en question tels que les états des différentes interfaces, la position de l'utilisateur etc.
- Module d'estimation de la consommation d'énergie (*Service Energy Consumption Estimator*) : Ce module est responsable de l'estimation de la consommation d'énergie des flux de données, en se basant sur les informations relatives à chaque type de flux.

Ces processus de décision et de raisonnement sont responsables de la décision de sélection de l'interface et de la conservation de l'énergie sur l'ensemble de la session de l'utilisateur. Le module de gestion de session est responsable de minimiser le temps d'inactivité de chaque interface et donc son coût d'énergie d'attente (écoute) et de repos (veille). Le processus devrait recueillir des informations sur les activités du terminal mobile et le niveau de la batterie. Il doit connaître les flux de trafic en cours et de leurs exigences en termes de qualité de service.

Ce module possède une connaissance globale des réseaux disponibles et de leurs états de charge ainsi que du statut des différentes interfaces du terminal.

#### IV.2.4.1 Module de gestion de services

Ce module (cf. Figure 15) est responsable de l'optimisation de l'utilisation des interfaces radio des terminaux mobiles, et donc d'optimiser le coût énergétique de la transmission des données. Ce processus est initié par la première demande de chaque service envoyée par le terminal. L'idée est de sélectionner, pour chaque flux entrant, le réseau le plus approprié en termes de qualité de service et de coût énergétique. Le coût énergétique est calculé par le module d'estimation de la consommation d'énergie. Basée sur ces informations et sur l'état d'énergie du service actuel (s'il existe), ce module décide quelle interface peut être utilisée pour le nouveau service, et si nécessaire, de basculer les services actuels vers une nouvelle interface. Périodiquement, ce module met à jour les états de tous les services en cours.

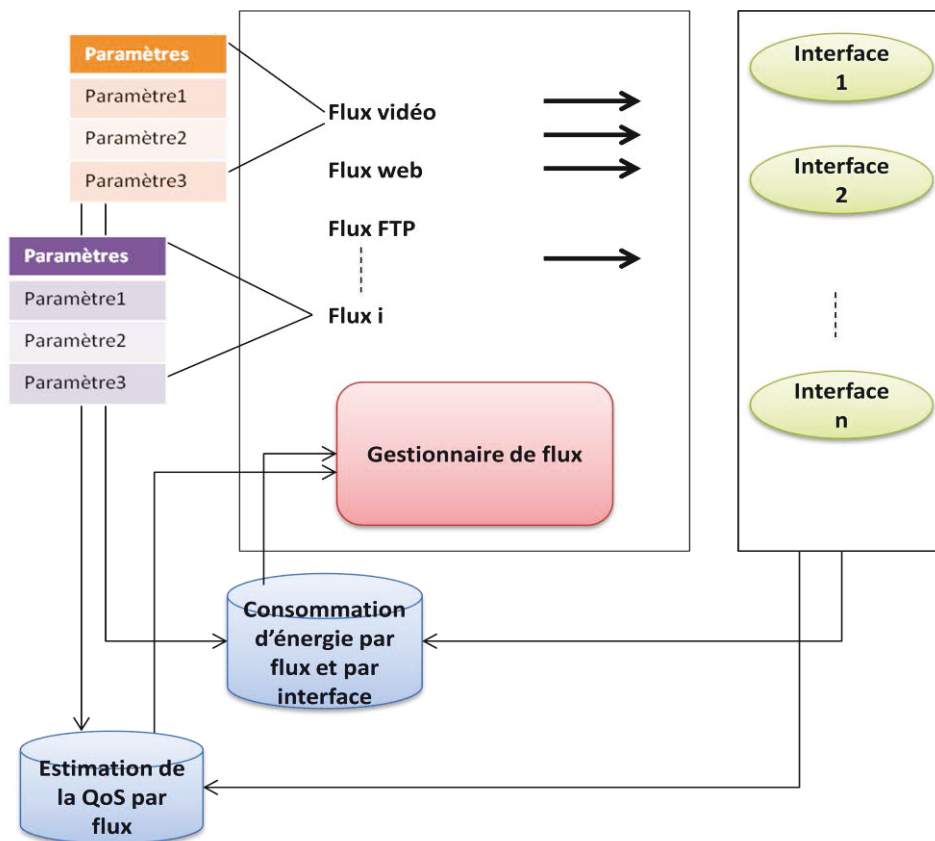


Figure 15: Principe de fonctionnement du gestionnaire des services (flux)

#### IV.2.4.2 Module d'estimation de la consommation d'énergie

Nous considérons ici un terminal mobile  $k$ , ayant  $m$  interfaces et  $n-1$  flux en cours. Lors de la réception d'une demande pour un  $n$ ème flux, le module de gestion de service identifie la classe d'application de ce flux, fait appel au module d'estimation de la consommation d'énergie qui analyse les



caractéristiques du service et applique le modèle énergétique propre à chaque interface. Dans le cas où une interface  $i$  est désactivée, ce module ajoute le coût énergétique de l'activation (scanning et association du terminal à un réseau).

L'estimation du coût énergétique est effectuée comme suit :

Soit :

- $m$  : nombre d'interfaces disponibles sur le terminal
- $p_i$  : nombre de flux en cours sur l'interface  $i$
- $d_{ij}$  : taille de données du flux  $j$ , en attente de transmission sur l'interface  $i$ ,  $j \in [1, p_i]$ ,  $i \in [1, m]$
- $c_i$  : conditions radio sur interface  $i$
- $E_i(d_{ij}, c_i)$  : énergie consommée par l'interface  $i$  pour transmettre  $d_{ij}$ ,  $j \in [1, p_i]$ ,  $i \in [1, m]$

A l'état initial (terminal ayant  $n-1$  flux en cours), l'énergie totale de transmission consommée par l'ensemble des interfaces est alors exprimée par :

$$E = \sum_{i=1}^m E_i \left( \sum_{j=1}^{p_i} d_{ij}, c_i \right)$$

Notre objectif d'optimisation consiste à minimiser la consommation d'énergie de l'ensemble des interfaces. A la réception une nouvelle demande de service (*nième* flux), minimiser l'énergie globale correspond à choisir l'interface qui permet d'atteindre l'objectif suivant :

$$\min_i \left( E_i \left( \sum_{j=1}^{p_i} d_{ij} + d_{in}, c_i \right) + P_i \cdot E_{\text{activa}_i} + \sum_{h \neq i} E_h \right), \quad \text{avec } \begin{cases} P_i = 0 & \text{si } i \text{ est active} \\ P_i = 1 & \text{si non} \end{cases}$$

Avec  $E_{\text{activa}_i}$  est l'énergie de l'activation de l'interface  $i$  si elle est désactivée.

#### IV.2.4.3 Module de gestion de sessions

Ce processus est responsable de la gestion des interfaces. Il permet de minimiser le coût énergétique d'inactivité en minimisant le temps passé en veille par les interfaces radio. Après avoir récupéré les informations sur les états de chaque interface depuis le module « Gathering Context Module », le processus de gestion des sessions estime le temps passé dans un état d'inactivité. Si ce temps dépasse un certain seuil et qu'il n'y a pas de nouveaux flux de données entrants, la décision de désactiver l'interface wifi est prise et envoyée au terminal mobile.

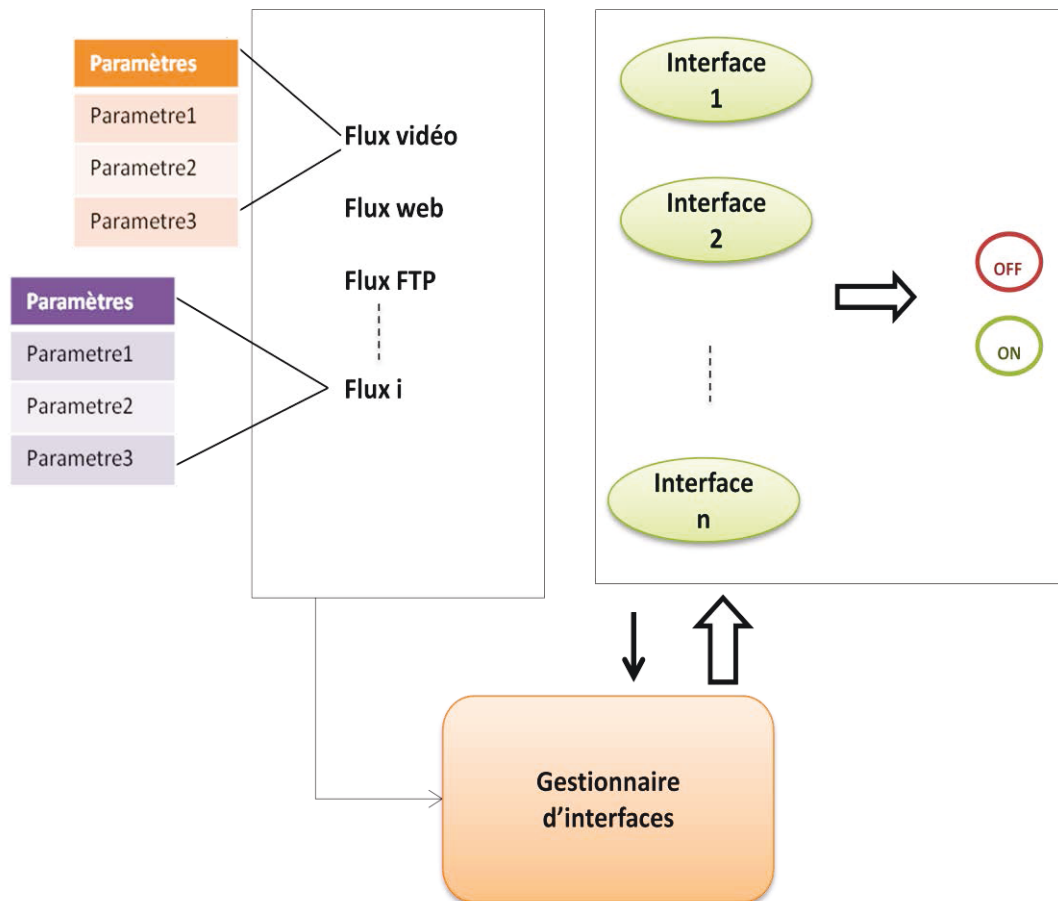


Figure 16: Module de gestion de sessions « Session Monitoring Process »

#### IV.2.4.4 Module de collecte de contexte

Le terme contexte désigne ici l'ensemble des informations pouvant renseigner sur l'état d'un terminal ou son environnement réseau et applicatif pouvant être utilisées pour l'optimisation de sa consommation d'énergie.

On distingue généralement deux types de données :

- Données dynamiques : Ces informations varient dans le temps et concernent généralement les informations liées à la qualité du lien, la charge du réseau, la position de l'utilisateur, le type du trafic entrant, etc. Afin d'avoir une décision optimale, ces informations doivent être collectées périodiquement ou à la demande et mises à la disposition de l'entité responsable de la prise de décision.
- Données statiques : Ces informations varient peu au cours du temps ou changent d'une manière peu fréquente. A titre d'exemple, nous pouvons citer les informations liées aux utilisateurs, à leurs préférences (réseau préféré, technologie préféré.) et aux coûts des transmissions. Il ne semble donc pas nécessaire de collecter ces informations de manière fréquente.

Le « Gathering Context Module » est responsable de la collecte périodique de ces informations, et en particulier

- Les informations sur l'état de chaque interface radio du terminal mobile
- La liste des réseaux disponibles en fonction de la position de l'utilisateur
- Tout le contexte dynamique envoyé périodiquement par le terminal mobile

Ce module récupère également et garde en mémoire les informations statiques de contexte tels que les préférences de l'utilisateur en terme de qualité de service souhaitée, ses réseaux préférés etc.

La communication des informations entre ces modules ainsi que la communication avec toutes les autres entités du système est très importante pour atteindre une amélioration considérable dans la minimisation de la consommation d'énergie.

#### **IV.2.4.5 Solution globale et Virtualisation**

La solution globale que nous proposons pour la gestion des interfaces radio des appareils mobiles est présentée sur la Figure 18. Cette solution repose sur une vision globale avec un système capable de recueillir les informations utiles de contexte depuis des sources variées et de décider dynamiquement de la meilleure façon dont les interfaces du terminal pourraient être utilisées.

La solution proposée exploite également la virtualisation permettant la délégation de certaines fonctionnalités tels que les tâches d'analyse, de raisonnement et de décision, à une entité overlay permettant d'épargner le terminal mobile de toute les tâches gourmandes en termes de consommation d'énergie.

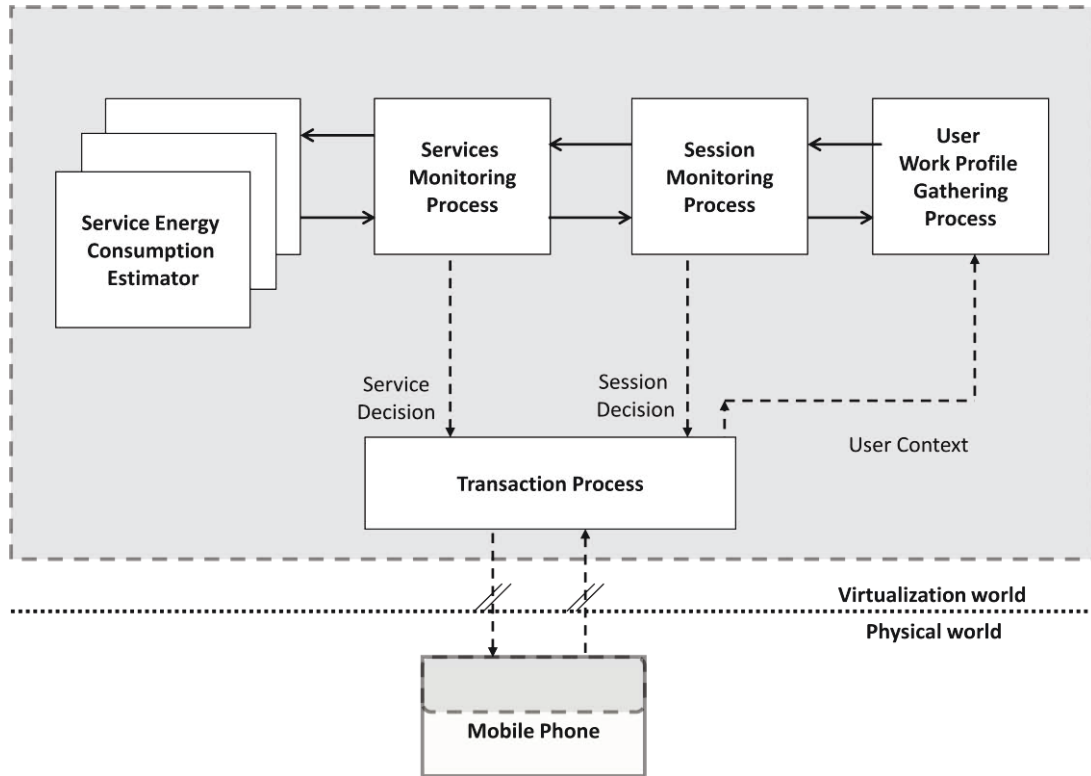


Figure 17: Architecture de l'agent ECO-WISM

### IV.3 Evaluation de Performances

Pour répondre aux besoins évoqués dans les sections précédentes, en particulier le besoin de déléguer les tâches fonctionnelles en partie ou en totalité à un tiers pour minimiser les calculs et les traitements sur le terminal mobile, nous avons choisie d'utiliser une architecture basée sur un système multi-agent. Cette approche permettrait également d'avoir plus facilement accès à toutes les informations nécessaires pour la prise de décision via des mécanismes d'échange inter-agents.

La solution d'implémentation est présentée sur la Figure 18. Elle se base sur une solution architecturale proposée par Loukil et al [84], composée de deux niveaux d'abstraction.

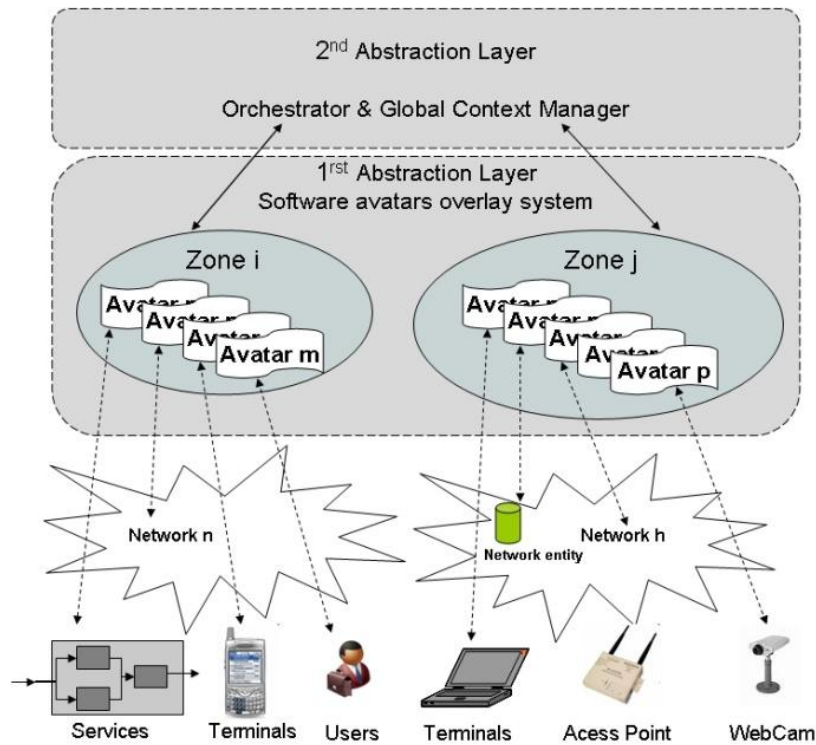
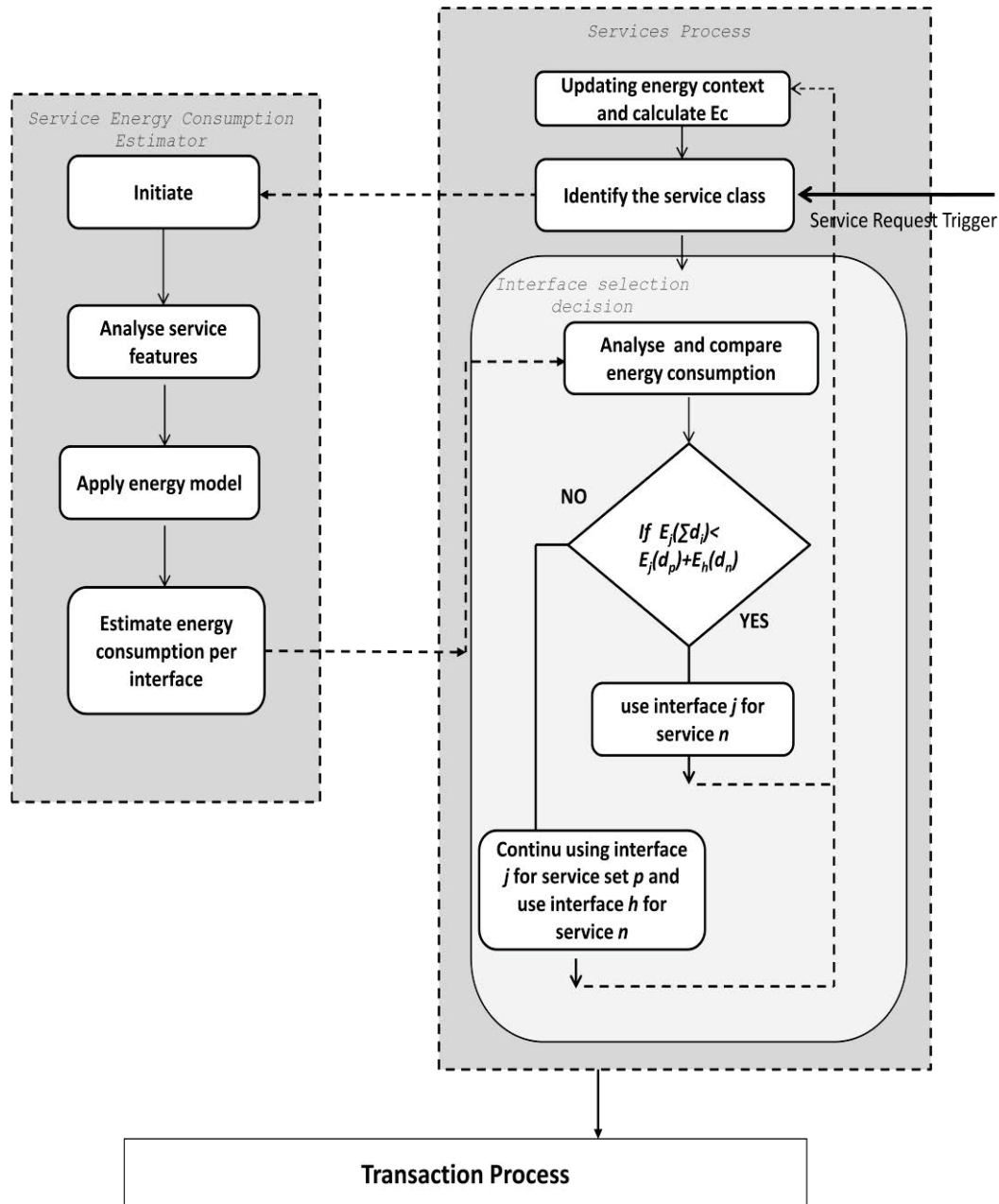


Figure 18: Une architecture overlay sur deux niveaux d'abstraction [84]

Le premier niveau est composé par des agents logiciels qui représentent les entités physiques d'un réseau sans fil, tels que les utilisateurs et leurs équipements, les routeurs (réseau), les serveurs et les services, etc. Le deuxième niveau d'abstraction représente l'intelligence centrale capable de communiquer avec toutes les autres entités et qui gère les informations statiques.

C'est sur cette architecture nous avons implémenté notre proposition de gestion d'interface en vue de son évaluation. Nous avons développé l'agent logiciel qui représente le terminal mobile dans la plateforme et nous avons développé et intégré les quatre modules d'analyse, raisonnement et décision décrits dans la section IV.2.4. Nous avons également enrichie les autres composante de la plateforme pour tenir compte de l'aspect énergie décrits dans cette thèse (modèles, estimations, ..) et mécanismes d'échange correspondants.

Figure 19: Module de gestion de services (*Service Monitoring Process*)

Le module de gestion des services, présenté sur la Figure 19, a pour rôle l'optimisation de la sélection d'interface pour chaque flux de données afin d'augmenter l'efficacité énergétique de transmission. Lors de la réception d'un déclencheur « *service request trigger* », le service entrant est identifié et le module « *service energy consumption* » estime la valeur de l'énergie qui serait consommée pour ce flux de données sur chaque interface radio. Dans le cas où l'interface wifi est éteinte, le coût énergétique du scanning et de l'association au point d'accès sont estimés et ajoutés à l'estimation de la consommation d'énergie de cette interface. Cette valeur est retournée au module de gestion de service, qui après avoir comparé le coût énergétique de l'interface wifi, 3G et 2G, choisit l'interface la plus adéquate et envoie sa décision au module « *transaction process* ». Ce dernier s'occupe alors de la

conversion de cette décision en message « ACL » (Agent Communication Language) et de l'envoi de ce message au terminal mobile.

Concernant l'optimisation de l'inactivité du terminal mobile, le module de gestion de session, présenté sur la Figure 20 analyse périodiquement l'état de chaque interface à partir des données qui lui ont été communiquées par le bloc « *gathering context* ».

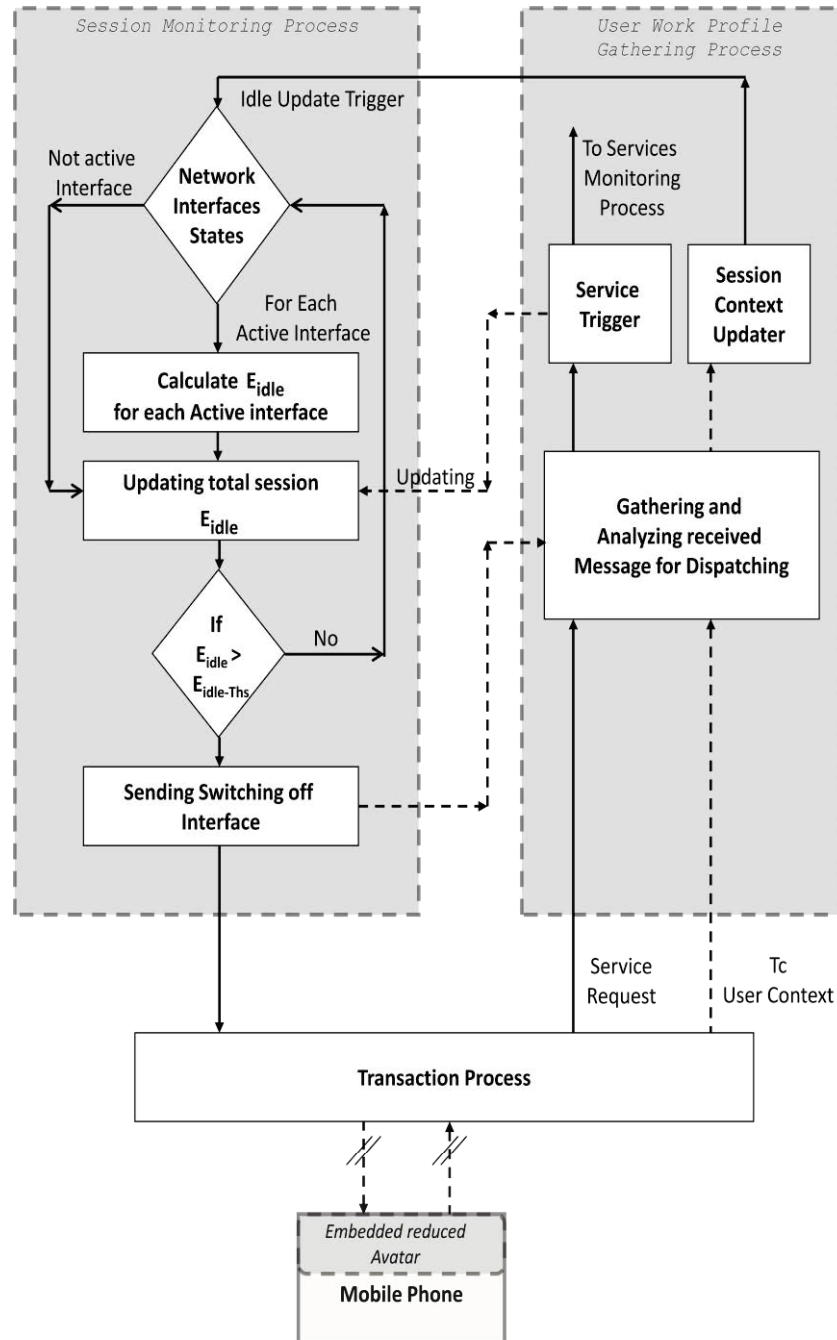


Figure 20: « *Gathering Context Module* » & « *Session Monitoring Module* »

Pour chaque interface, le gestionnaire de session estime l'énergie totale consommée par le terminal mobile à l'instant  $t$  en mode « Veille »  $E_{idle}$ . Si cette valeur dépasse un seuil prédéfini, la décision d'éteindre l'interface est prise. Cette décision sera envoyée par le block « transaction process » au terminal mobile et communiquée au module « *gathering process* » pour la mise à jour des informations de contexte.

L'évaluation des performances de notre approche avec l'ensemble de l'architecture décrite ci-dessus est effectuée sur un test-bed (plateforme réelle) de laboratoire que nous avons développé sous l'environnement JAVA (framework JADE de développement en JAVA pour agents logiciels). Deux parties sont développées dans ce test-bed. La première concerne les agents logiciels et la deuxième concerne l'émulateur du terminal mobile.

- Les terminaux mobiles sont émulés en utilisant des agents logiciels et implémentés sur des PC distants. Chaque agent envoie périodiquement, toutes les trois secondes, le contexte dynamique du terminal. Ce contexte contenant plusieurs paramètres tels que la position du terminal mobile ainsi que les réseaux disponibles dans chaque région est obtenu à partir de fichiers traces générés à l'avance. Le modèle de mobilité des TM est « random Gauss-Markov model ».
- La plateforme des agents virtuels est hébergée sur un serveur dont les caractéristiques techniques sont : processeur Intel Xeon 2.8 GHz, Ram 3GB, Mémoire cache 4MB, JVM 1.6. La version utilisée de JADE est 3.4 et la mémoire dédiée à JAVA est de 512 MB. Nous avons développé les modules de gestion des services et de gestion des sessions au sein de chaque agent utilisateur. Nous avons aussi effectué tous les tests unitaires et de validation nécessaires pour s'assurer de l'intégration de notre solution au sein de l'architecture multi-agents.

La communication entre les agents se fait avec le langage ACL (Agent Communication Language) qui assure une communication unifiée entre tous les agents du système.

La solution proposée est comparée à un système dans lequel seule la puissance du signal est utilisée pour la sélection d'interface. Les consommations d'énergie par service, par session et par terminal mobile ont été estimées et comparées. Le scénario considéré est composé d'un ensemble de terminaux mobiles multimodaux équipés de trois interfaces : WiFi, EDGE et 3G.

Les services sont générés aléatoirement avec différentes exigences de bande passante et de qualité de service. Pour les évaluations, nous avons considéré trois types de services qui sont le streaming vidéo, e-mail et le transfert de fichiers. Les services sont générés au hasard dans un intervalle de temps basé sur des statistiques réalistes. Lors de l'arrivée d'un nouveau service, le flux correspondant est envoyé / reçu sur l'interface choisie en fonction de la stratégie proposée. Afin d'obtenir des statistiques significatives, le nombre de services invoqués au cours de chaque session, varie de façon aléatoire.



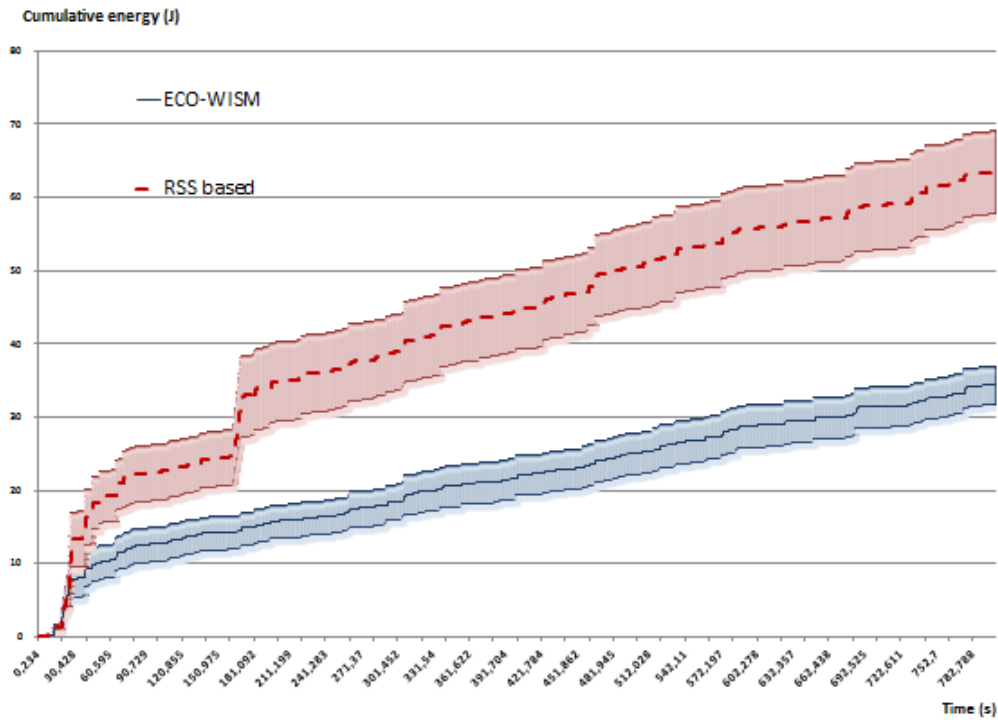


Figure 21: Consommation moyenne d'énergie (en Joule) avec et sans ECO-WISM

La Figure 21 montre les consommations cumulée d'énergie en Joules au cours du temps pour un utilisateur avec et sans notre approche. Les résultats indiquent que la proposition ECO-WISM affecte positivement la consommation d'énergie du terminal avec un gain pouvant dépasser les 45 % dans certains scénarios.

Comme nous l'avons présenté dans les sections précédentes, et selon plusieurs études, le mode Veille « idle » consomme une quantité non négligeable d'énergie pour la plupart des technologies sans fil. Un autre facteur important est que l'évolution de la consommation d'énergie des interfaces radio en fonction de la quantité de données à transférer n'est pas linéaire. Considérer l'ensemble de ces facteurs pour une optimisation globale qui permet d'attendre des résultats est aussi intéressants.

La Figure 22 détaille la consommation d'énergie lors d'une session avec et sans la proposition ECO-WISM, pour les deux modes d'interface: en veille et durant un transfert de données. Ce résultat illustre le fait que notre mécanisme de sélection d'interface prend les décisions les plus adaptées, lorsqu'on considère la QoS et la consommation d'énergie simultanément.

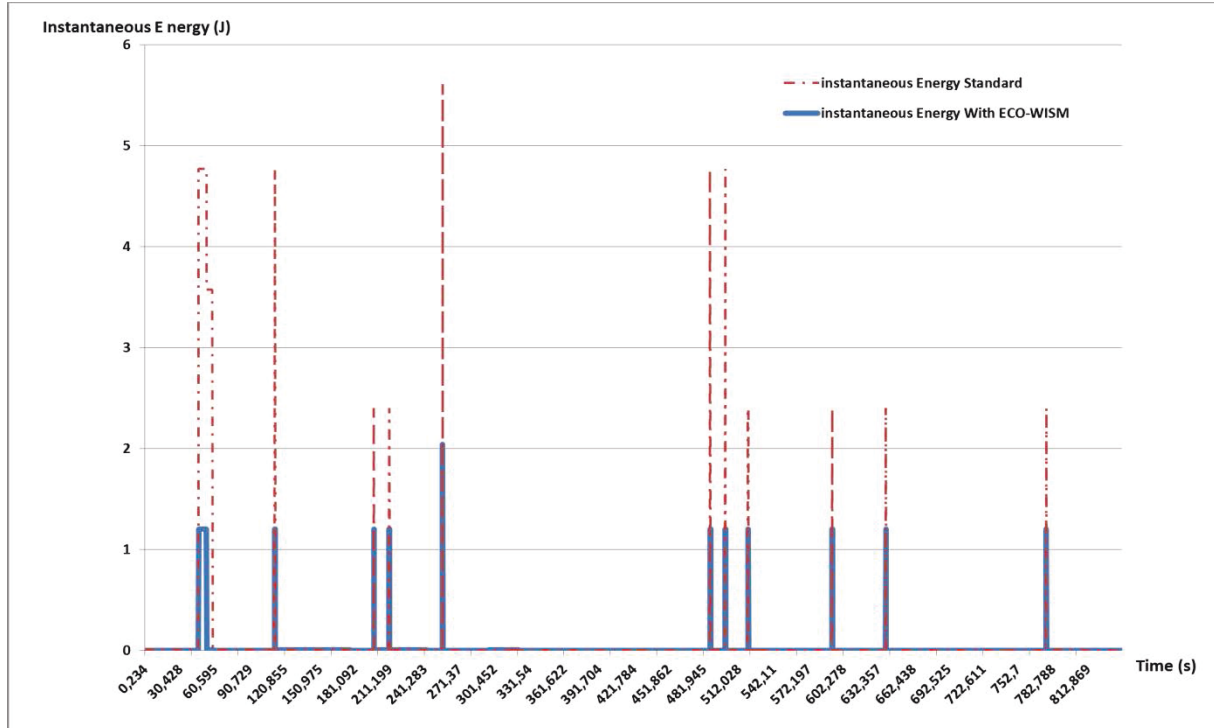


Figure 22: Energie instantanée (en J) avec et sans ECO-WISM en fonction du temps (en s)

Le mécanisme proposé permet non seulement d'optimiser l'utilisation des interfaces radio en choisissant le réseau qui convient le mieux au service, il surveille également les interfaces réseau du terminal au cours de la session et décide d'activer ou de désactiver ses interfaces selon les règles d'optimisation décrites dans les sections précédentes.

## IV.4 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons présenté ECO-WISM, une solution de gestion d'interfaces radio d'un terminal multimodal dans le but d'augmenter la durée de vie de sa batterie. Ce mécanisme permet, d'une part de minimiser la consommation d'énergie pendant les phases d'inactivité (veille) en éteignant l'interface si la période d'inactivité dépasse un seuil donné. D'autre part, la solution permet de réduire la consommation d'énergie des interfaces pendant les phases d'activité. L'algorithme d'association flux/interface proposé se base sur les informations de contexte et minimise la consommation d'énergie de transmission. Nous avons également proposé de déléguer ces tâches d'analyse, de raisonnement et de décision à un tiers (agent logiciel) déporté sur une architecture overlay afin de minimiser encore la consommation d'énergie causée par les calculs et l'exécution d'algorithmes complexes sur le terminal mobile. Les résultats obtenus montrent qu'un gain d'énergie important peut être réalisé en comparaison avec le cas où la sélection d'interface est basée seulement sur la puissance du signal reçu.

Ce gain pouvant dépasser les 40% provient de la diminution de l'énergie consommée en mode veille et en mode transmission. Notre proposition considère en plus des coûts de transfert de paquet, les opérations de scanning et d'association de différentes interfaces.

L'apport de l'approche proposée est double. D'une part, il apporte une optimisation globale de la consommation d'énergie des terminaux mobiles qui comprend deux aspects : la minimisation de l'énergie en mode veille et l'optimisation de l'énergie en mode transfert. D'autre part, la virtualisation permet d'avoir une connaissance globale et partagée sur l'ensemble des paramètres qui peuvent influencer la décision des terminaux. Elle permet également de le décharger d'une multitude de tâches pouvant être gourmandes en termes de ressources et d'énergie. Cependant les échanges entre le terminal mobile et son agent logiciel peuvent constituer, a priori, un facteur qui augmenterait la consommation d'énergie du terminal. Néanmoins, vu que notre approche nécessite toujours qu'une interface reste active pour garder le contact avec l'agent (généralement celle qui consomme le moins l'énergie (i.e. l'interface 2G), l'échange des message ACL, ayant de petites tailles (chaîne de caractère) a un impact négligeable sur la consommation globale d'énergie si nous considérons des applications ayant des flux de données de grande taille tel que la vidéo streaming ou encore la visioconférence.

Dans le chapitre suivant, nous considérons certains aspects de l'efficacité énergétique côté réseau.

# **V. Association dynamique des utilisateurs et techniques d'ordonnancement dans les réseaux auto-organisés LTE**

## **V.1 Introduction**

La conservation d'énergie sur les stations de base est une problématique cruciale. En effet, celles-ci consomment plus de la moitié de l'énergie totale utilisée par un réseau d'accès (cf. Section I.1). Plusieurs approches sont explorées dans la littérature visant à réduire la consommation d'énergie sur les réseaux d'accès radio. Une première approche regroupe les techniques dites d'endormissement (cf. Section II.3.2.1). Il s'agit de mettre les stations de base, non utilisées, en veille pour une certaine période. Ceci se produit essentiellement en périodes creuses où à faible charge de trafic. Les stations avoisinantes adaptent alors leurs puissances pour couvrir la zone concernée. Dans certaines études, il est proposé de faire coopérer plusieurs opérateurs avec la technique du roaming, toujours pendant les heures creuses afin de réduire le nombre de stations actives. Une autre approche qui lui est complémentaire consiste à optimiser l'association des utilisateurs aux stations de base de manière intelligente. Toutes ces techniques introduisent plus de dynamique dans les réseaux mobiles et sont considérées très prometteuses dans l'optique des réseaux LTE hétérogènes et auto-organisant.

L'utilisation de cellules de petites tailles (i.e. micro-eNodeB, pico-eNodeB et Femto-eNodeB cf. plus bas), moins coûteuses en termes d'énergie, complique la problématique de l'association. En effet, les techniques traditionnelles d'association d'utilisateurs, se basent essentiellement sur la force du signal reçu qui détermine la station de base la plus proche.

Si les réseaux mobiles actuels se basent essentiellement sur des macro-cellules pour garantir une couverture sur un vaste territoire, l'utilisation de micro-cellules est parcellaire et concerne des zones urbaines particulières avec un trafic dense telles que les centres commerciaux et les quartiers d'affaires. Sur ces zones de couverture, plusieurs facteurs poussent les opérateurs à densifier leurs réseaux dont les plus significatifs sont les suivants [85]:

- Un nombre d'utilisateurs très important dans une zone géographique limitée
- Une activité forte des utilisateurs et une exigence plus prononcée en termes de QoS
- Une mauvaise qualité du signal à cause de nombreux obstacles (densité et hauteur des bâtiments, effets multi-trajets, etc.)
- De fortes interférences à cause d'un grand nombre d'utilisateurs et des nombreuses réflexions créant des multi-chemins

Dans ce contexte, l'utilisation de cellules de plus petites tailles, avec moins de puissance, représente une solution intéressante. En effet, les petites cellules permettent de gérer un plus petit nombre d'utilisateurs minimisant ainsi la puissance par antenne (donc moins d'interférences). C'est aussi une solution de densification qui permet au réseau de servir en parallèles un plus grand nombre d'utilisateurs grâce à une meilleure réutilisation des ressources. D'un autre côté, le déploiement de petites cellules à l'intérieur et/ou à l'extérieur des bâtiments (cf. Figure 23) permet de diminuer effectivement la distance moyenne entre émetteurs et récepteurs, ce qui entraîne des pertes de propagation plus faibles, des débits plus élevés et une meilleure couverture.

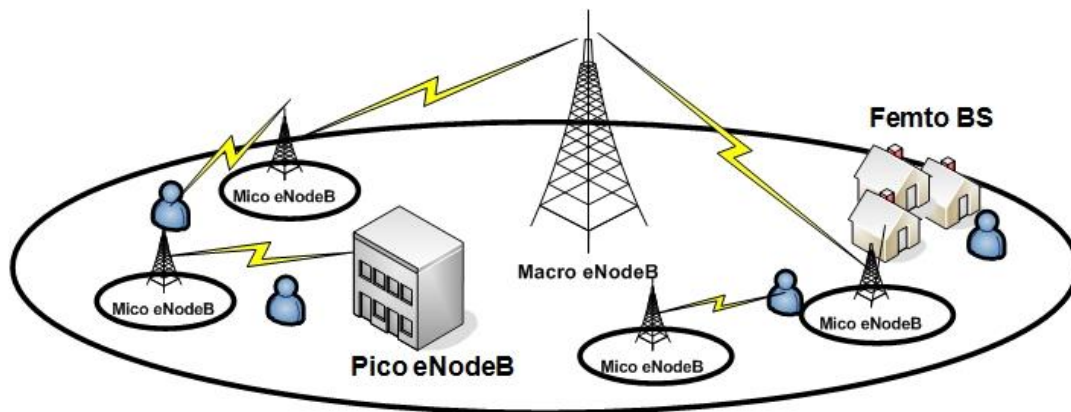


Figure 23: Coexistence de cellules de tailles différentes dans les réseaux hétérogènes

De façon concrète, les réseaux hétérogènes peuvent utiliser plusieurs types de cellules: les macro cellules, les micro cellules, les pico cellules et les cellules domestiques (Femtocell), classées ici par ordre décroissant de puissance d'émission.

- **Macro-cells** : Se sont les cellules ayant le plus grand rayon de couverture, variant de 1 à quelques dizaines de km, dépendant de façon générale de la zone de déploiement. Dans les zone rurale par exemple, leur couverture peut atteindre jusqu'à 30 km, alors que dans les zones urbaines comme des villes, elle est généralement comprise entre 1 et 3 km. La puissance d'émission des Macro-eNodeB se situe dans l'intervalle [43–49 dBm].

- **Micro-cells** : Parmi les petites cellules « small cells », se sont les cellules ayant la plus grande taille. Leurs couvertures sont généralement comprises entre 100 et 500m, alors que leurs puissances d'émission varient dans l'intervalle [37-40 dBm].
- **Pico-cells** : Ces cellules sont plus petites que les précédentes et ont été conçues pour une utilisation en zones fermées ou ouvertes. Leurs couvertures ne dépassent pas 100m et leurs puissances d'émission varient entre 18 et 24dBm.
- **FemtoCell**: Connues aussi sous le nom de « Home eNodeB » car elles sont conçues pour être utilisées dans les petits espaces fermés tels que les maisons ou encore les bureaux. Les FemtoCells sont les plus petites cellules. Elles sont généralement équipées d'antennes omnidirectionnelles et leurs rayons de couvertures ne dépassant pas les quelques dizaines de mètres. Leurs puissances d'émission étant la plus faible parmi les stations de base variant entre 10 et 20 dBm seulement.

Le Tableau 10 ci-dessous résume les principales caractéristiques des différents types de cellules dans les réseaux LTE hétérogènes:

Type de cellule	Puissance d'émission (dBm)	Couverture	Emplacement	Type d'antenne
<b>Macro</b>	43-49	1-3 km	Ville	Directionnelle (tri-sectorisation)
<b>Micro</b>	37-40	100-300 m	Ville	Omnidirectionnelle
<b>Pico</b>	18-24	< 100 m	Entreprise	Omnidirectionnelle
<b>Femto</b>	10-20	10-50 m	Maison/bureau	Omnidirectionnelle

Tableau 10: Caractéristiques des différents types de cellules dans les réseaux LTE HetNet

Notons qu'en pratique, la taille réelle d'une cellule dépend, non seulement de la puissance d'émission, mais aussi de la hauteur et de l'inclinaison de l'antenne, ainsi que de la nature des obstacles l'entourant (hauteurs, épaisseurs, matériaux, dispositions, ...).

Dans les réseaux HetNet, ces différents types de cellules vont coexister. Pour plusieurs raisons citées plus haut, leurs zones de couverture ne seront pas exclusives et des superpositions sont souvent volontairement et/ou involontairement maintenues par les opérateurs. Dans ce contexte, l'association des utilisateurs aux cellules devient plus complexe et nécessite de nouvelles approches plus efficaces que la simple comparaison des niveaux des signaux reçus. C'est ce que nous nous proposons d'étudier dans ce chapitre.

Dans les sections qui suivent, nous proposons un algorithme distribué d'association des utilisateurs aux différentes stations de base dans un réseau cellulaire hétérogène de type HetNet, ayant pour

objectif de réduire la consommation d'énergie globale dans le réseau d'accès, tout en garantissant la QoS requise par les utilisateurs. Mais avant cela, nous allons analyser l'état de l'art dans ce domaine.

## **V.2 Solutions existantes pour l'association des utilisateurs dans les réseaux auto-organisés LTE**

Afin de faire face d'une part à l'évolution des usages et à la croissance continue du trafic de données générées par les utilisateurs, et d'autre part aux attentes des utilisateurs en termes de QoS et QoE, plusieurs mécanismes et techniques ont été étudiés et proposés dans le cadre des réseaux cellulaires de nouvelle génération LTE. A titre d'exemple, la technique d'accès OFDMA permet d'éviter les interférences intracellulaires en allouant des blocs de ressources orthogonaux pour les différents utilisateurs d'une même cellule. Cependant, d'autres problèmes tels que les interférences intercellulaires et la répartition, généralement non uniforme, des utilisateurs entre les cellules, représentent des facteurs majeurs de dégradation des performances du système et restent sujets à optimisation. L'association des utilisateurs aux différentes cellules reste donc une des problématiques à considérer afin de mieux gérer les ressources et afin d'accroître la QoE de l'utilisateur. De surcroît, cette association peut se faire de façon dynamique de sorte à adapter les décisions au contexte fluctuant de l'environnement.

Dans la littérature, plusieurs travaux ont abordé la problématique d'association des utilisateurs dans le contexte des réseaux LTE. La plupart de ces solutions ont pour objectif d'améliorer les performances des réseaux en termes d'efficacité spectrale ou de distribution des charges entre les macro-cellules (load balancing) [86], [87], [88], [89]. Cependant, la plupart de ces solutions ne sont pas adaptées aux cas des réseaux LTE hétérogènes, vu que les critères utilisés pour l'association des utilisateurs ne tiennent pas compte réellement de l'existence et des caractéristiques des petites cellules. En effet, comme nous l'avons indiqué dans la section précédente, les Micros eNodeBs (e.g. Pico, Femto, Micro) se caractérisent par des puissances d'émission inférieures à celles des Macros eNodeB. Or, si on ne considère que la puissance reçue ou le rapport puissance sur interférence et bruit (SINR) dans la décision du choix de la cellule, ce que font la plupart de ces approches, les utilisateurs vont être majoritairement associés aux macro-cellules. Il paraît donc nécessaire de considérer d'autres critères, de proposer de nouvelles approches ou d'adapter celles existantes.

C'est dans ce sens que des travaux plus récents ont été proposés [90], [91], [92]. Les auteurs dans [90] ont proposé une solution pour l'association des utilisateurs dans le cadre des réseaux LTE HetNet dont l'objectif est la répartition et l'équilibrage des charges. Les auteurs dans [91], ont proposé une solution d'association des utilisateurs dans le cadre des réseaux LTE HetNet réalisant un compromis entre l'équilibre des charges et l'efficacité spectrale. En se basant sur la notion du Topological Potential, ils ont proposé une métrique d'attractivité pour les stations de base. Les charges des stations de base,

exprimées par le nombre d'utilisateurs qui lui sont associés ainsi que l'efficacité spectrale sont considérés comme métriques pour le choix du eNodeB.

S. Corroy et al [92] ont proposé un algorithme heuristique d'association des utilisateurs. Ils ont considéré le cas où seulement une macro et une pico cellules coexistent. Les terminaux mobiles sont triés en fonction de la différence de puissance reçue du eNodeB de la macro cellule. Ensuite, il calcule le débit moyen atteint par (n+1) options d'association différentes (n est le nombre des terminaux mobiles par macro cellule), commençant par l'état initial où tous les utilisateurs sont associés avec la macro eNodeB. L'utilisateur ayant la plus grande différence de puissance reçue est alors affecté à la pico eNodeB la plus proche de sa macro eNodeB et le débit moyen résultant est calculé. Ce processus est répété jusqu'à ce que tous les équipements utilisateurs soient associés à leurs pico eNodeB respectifs.

En parallèle, la conservation d'énergie à travers l'optimisation de l'association des utilisateurs gagne en intérêt ces dernières années. C'est essentiellement l'impact de la charge des stations de base qui semble un des facteurs les plus déterminant dans leur consommation de puissance, en particulier à travers la puissance utilisées par les amplificateurs. Ainsi, plusieurs travaux récents ont concerné l'étude de l'efficacité énergétique pour l'association des mobiles aux stations de base [57], [58], [93].

K. Son et al [93] proposent une nouvelle approche d'association des utilisateurs qui consiste à réaliser un compromis entre la consommation de puissance des stations de base et les performances des réseaux exprimées en termes de durée de transfert de fichiers. Les auteurs ont présenté une solution qui détermine la charge optimale des différentes stations de base en minimisant une fonction coût exprimée par :

$$\varphi_a(\rho, B_{ON}) + \eta \psi(\rho, B_{ON})$$

Où

$\rho$  est la charge des stations de bases

$B_{ON}$  est l'ensemble des stations de base actives

$\eta$  est un paramètre qui détermine le degré du compromis souhaité entre les deux fonctions de coût énergétique  $\psi$  et de QoS  $\varphi$ .

Dans [58], les auteurs ont proposé un mécanisme d'association des utilisateurs dans les réseaux LTE HetNets auto-organisés. Leur approche consiste à associer dans un premier temps chaque utilisateur à la station de base qui lui maximise son débit. Ensuite, chaque station de base décide d'être en mode actif ou en mode veille en considérant conjointement l'effet de cette décision sur l'efficacité spectrale et sur sa consommation d'énergie.



Les auteurs, dans [57], ont proposé un algorithme d'équilibrage de charge maximisant l'efficacité énergétique des cellules. Un facteur mesurant l'efficacité énergétique est introduit dans les critères de sélection de la cellule cible afin de réaliser l'optimisation conjointe de l'équilibre de la charge et l'économie d'énergie. Les résultats de simulation montrent que l'algorithme proposé permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et d'améliorer le débit dans la cellule.

### **V.3 Contribution 3 : Association dynamique des utilisateurs avec un compromis efficacité spectrale / consommation énergétique**

Parmi les solutions exposées dans la section précédente, certaines ne considèrent pas la puissance consommée par les eNodeB comme critère de décision pour l'association des utilisateurs. D'autres cependant tiennent compte des aspects énergie mais ne traitent pas le cas des réseaux LTE hétérogènes où des cellules de différents types coexistent et se superposent.

Nous cherchons dans cette section à proposer un algorithme d'association dynamique des utilisateurs dans le cadre d'un réseau LTE hétérogène, tenant compte de la coexistence de cellules de tailles différentes.

L'idée que nous proposons est de définir et d'attribuer des facteurs d'attractivité adaptés aux différentes stations. Ces facteurs tiennent compte des aspects énergétiques spécifiques à chaque catégorie (eNodeB, Micro-eNodeB, Pico-eNodeB et HeNodeB). Les utilisateurs seront par la suite associés à la station de base la plus attractive, de façon à minimiser la consommation d'énergie de l'ensemble des stations de base d'un réseau donné.

Le facteur d'attractivité, combine un ensemble de métriques mariant QoS et consommation d'énergie pour définir ce qu'on a appelé facteur GTP « Green-Topological Potential ». Les détails de cette proposition sont décrits dans les sections suivantes.

#### **V.3.1 Métriques d'association**

L'algorithme que nous proposons pour l'association dynamique des utilisateurs dans un réseau LTE hétérogène, a pour objectif de minimiser la consommation globale d'énergie tout en respectant la qualité de service. Il se base sur les métriques suivantes :

- **QoS** : Pour les réseaux cellulaires, plusieurs paramètres peuvent définir la qualité de service. Certains de ces paramètres sont directement liés au canal tels que le rapport porteuse sur interférences (CIR : Carrier-to-Interference Ratio), le rapport signal sur interférences et bruit (SINR : Signal to Interference plus Noise Ratio) et l'Efficacité Spectrale (ES). L'Efficacité Spectrale est un facteur qui mesure la qualité de l'expérience de l'utilisateur dans chaque

cellule. Selon la norme 3GPP [94], en se basant sur l'équation de Shannon, pour un SINR donné, l'Efficacité Spectrale pour un utilisateur  $i$  associé à un eNodeB  $j$  est définie par :

$$ES_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } SINR_{ij} < SINR_{\min} \\ \alpha \log_2(1 + SINR_{ij}) & \text{si } SINR_{\min} < SINR_{ij} < SINR_{\max} \\ C_{\max} & \text{si } SINR_{ij} > SINR_{\max} \end{cases}$$

Où les valeurs  $SINR_{\min}$  et  $SINR_{\max}$  sont égales à -10dB et 22dB respectivement,  $\alpha$  est le facteur d'atténuation qui représente des pertes de mise en œuvre. Selon la norme 3GPP [94], il est de 0,6 pour les liaisons descendantes (Downlink) et de 0,4 pour les liaisons montantes (Uplink).

Rappelons que le SINR est une mesure qui permet de calculer le rapport entre le niveau du signal utile et ceux des interférences et de bruit:

$$SINR = \frac{\text{Puissance du signal utile}}{\text{Puissance de l'interférence} + \text{Puissance du bruit}}$$

**Métrique énergétique** : Dans la littérature, plusieurs travaux ont proposé des modèles de la puissance consommée par les différentes stations de base dans les réseaux LTE HetNets (cf. section II.3.1). Dans [49], les auteurs ont proposé des modèles de consommation de puissance pour les macro et pour les micro stations de base. La puissance consommée par les différents types de stations de base est exprimée comme suit :

$$P_{macro} = n_{sector} \cdot (P_{rect} + l_j \cdot (n_{Tx} \cdot (P_{amp} + P_{trans}) + P_{proc}) + P_{link} + P_{airo})$$

La puissance consommée par une micro station de base est exprimée par :

$$P_{micro} = P_{rect} + l_j \cdot (P_{amp} + P_{trans} + P_{proc}) + P_{airo}$$

Où

$l_j \in [0,1]$  est le taux de charge de la station de base  $j$ . La valeur 0 correspond au cas où aucun utilisateur n'est associé à la station  $j$  et la valeur 1 est atteinte lorsque le nombre d'utilisateurs associés à cette station de base est équivalent à sa capacité maximale.

- $P_{rect}$  est la puissance du « rectifier »
- $P_{amp}$  est la puissance de l'amplificateur
- $P_{trans}$  est la puissance du « trancier »
- $P_{proc}$  est la puissance du processeur

- $P_{\text{airo}}$  est la puissance du climatiseur et
- $P_{\text{link}}$  est la puissance du « link »

Les valeurs sont détaillées dans le Tableau 11.

Dans le même contexte, la puissance consommée par une station de base de type FemTo, ne dépend pas du nombre d'utilisateurs associés. Elle est modélisée dans [50] par :

$$P_{\text{femto}} = P_{\text{mp}} + P_{\text{FPGA}} + P_{\text{trans}} + P_{\text{amp}}$$

Où

$P_{\text{mp}}$  est la puissance du microprocesseur

$P_{\text{FPGA}}$  est la puissance du FPGA

$P_{\text{trans}}$  est la puissance de l'émetteur

$P_{\text{amp}}$  est la puissance de l'amplificateur

Puissance en W	$P_{\text{rect}}$	$P_{\text{amp}}$	$P_{\text{trans}}$	$P_{\text{proc}}$	$P_{\text{airo}}$	$P_{\text{link}}$
Macro	100	156.3	100	100	225	60
Micro	100	24.6	100	100	60	—
Femto	—	2.4	1.7	7.9	—	—

Tableau 11: Puissance moyenne des différents composants des stations de base de types Macro, Micro et FemTo[49], [50]

Nous constatons que les niveaux de consommation des stations de base de type macro et micro dépendent de leurs charges. En effet, la puissance d'une station de base peut être exprimée par :

$$P_j = a.l_j + b$$

Où la quantité  $a$  exprime la portion de puissance de la station de base dépendant de la charge (e.g. puissance de l'amplificateur), et la quantité  $b$  exprime la portion de puissance constante, ne dépendant pas de la charge.

Les expressions correspondants aux quantités  $a$  et  $b$  sont détaillées sur le Tableau 12 :

Type de cellule	a	b
Macro	$n_{sector} \cdot l_j \cdot (n_{Tx} \cdot (P_{amp} + P_{trans}))$	$n_{sector} \cdot (P_{rect} + P_{proc}) + P_{link} + P_{airo}$
Micro	$l_j \cdot (P_{amp} + P_{trans} + P_{proc})$	$P_{rect} + P_{airo}$

Tableau 12: Puissance dépendante et indépendante de la charge des stations de base

L'efficacité énergétique peut être exprimée comme étant le rapport entre le nombre d'utilisateurs associés à la station ( $L_j$ ) et la puissance utilisée par celle-ci [95] :

$$EE_j = \frac{L_j}{P_j}$$

Cette métrique permet de mettre en évidence l'impact de la charge des eNodeB sur la puissance consommée. Dans la suite, nous considérons les métriques décrites ci-dessus afin de proposer notre algorithme d'association dynamique.

### V.3.2 Algorithme d'association dynamique des utilisateurs

Considérons une cellule macro-relais composée d'une station de base de type macro et de plusieurs nœuds relais (micro-stations). Dans la suite nous notons indifféremment les micro et macro stations de base par eNodeB.

Nous considérons  $N$  utilisateurs et  $M$  eNodeB. L'ensemble des eNodeB est dénotée par eNBs et l'ensemble des équipements terminaux est dénotée par UE.

L'objectif de l'algorithme est de garantir la QoS à l'ensemble des utilisateurs tout en minimisant la somme des puissances consommées par l'ensemble des stations composant le réseau d'accès :

$$\min_{j \in eNBs} \sum P_j$$

Où  $P_j$  désigne la puissance consommée par la station  $j$ .

L'algorithme exploite la notion de potentiel topologique « Topological Potential », introduite par Faraday dès 1837 pour présenter l'interaction entre les particules (sans contact) des atomes, jusqu'à l'Univers. Depuis, cette notion a été utilisée dans plusieurs domaines. Dans [96], les auteurs ont introduit cette approche pour étudier les dynamiques des topologies de réseaux. Les relations entre les nœuds sont décrites par le potentiel topologique, où la position du nœud dans la topologie du réseau est un paramètre principal. Considérant un graphe  $G = (V, E)$  où  $V = (v_1, \dots, v_n)$  est l'ensemble des

nœuds et  $E$  est l'ensemble des arrêtes. L'attractivité d'un nœud  $v_i$ , est alors décrite par son Topological Potential défini par :

$$TP_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n m_i e^{-d_{ij}/\sigma}$$

Où  $m_i$  est la masse du nœud  $v_i$  décrivant son activité,  $\sigma$  est la couverture du nœud et  $d_{ij}$  est la plus petite distance qui sépare les nœuds  $v_i$  et  $v_j$ .

Inspiré par les approches décrites précédemment, nous proposons une nouvelle métrique que nous désignons par GTP (Green Topological Potential). Elle permet de mesurer l'attractivité des stations de base en combinant la QoS et l'aspect énergétique.

$$GTP_{ij} = e^{-1}$$

Pour chaque couple (Utilisateur  $i$ , Station  $j$ ), nous définissons la métrique  $GTP_{ij}$  par :

$$GTP_{ij} = e^{-\left(\frac{1}{ES_{ij} \cdot EE_j}\right)^2} = e^{-\left(\frac{P_j}{\alpha \log(1 + SINR_{ij}) \cdot L_j}\right)^2}$$

Où

- $EE_j$  est l'efficacité énergétique du eNodeB $_j$
- $ES_{ij}$  est l'efficacité spectrale de l'utilisateur  $j$  s'il est associé à la station  $i$

Une station de base est considérée comme candidat potentiel pour un utilisateur si elle offre à cet utilisateur un Green Topological Potential supérieur à celui du eNodeB auquel il est déjà associé.

Le problème peut alors être formulé par la recherche de l'indicateur d'association des utilisateurs  $x = \{x_{ij}, i \in UE, j \in eNBs\}$  qui maximise le GTP de l'ensemble des terminaux mobiles comme suit :

$$\max_x \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} \cdot e^{-\left(\frac{P_j}{\alpha \log(1 + SINR_{ij}) \cdot L_j}\right)^2}$$

$$\text{Avec } \sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \quad \forall i \in UE$$

$$\text{et } x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in UE, \forall j \in eNBs$$

Étant donné que les contraintes du problème optimal sont non convexes, nous assouplissons la contrainte en modifiant  $x_{ij} \in \{0,1\}$  par  $0 \leq x_{ij} \leq 1$ . Ainsi le problème peut être réécrit comme suit :

$$\max_X \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} \cdot e^{-\left(\frac{P_j}{\alpha \log(1+SINR_{ij}) \cdot L_j}\right)^2}$$

$$\text{Avec } \sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \quad \forall i \in UE$$

$$\text{et } 0 \leq x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in UE, \forall j \in eNBs$$

De plus, la fonction  $e^{-x^2}$  est une fonction log-concave positive et donc elle est également quasi-concave. Par conséquent, la solution optimale existe. Cependant, la complexité du problème est de l'ordre de  $O(M^N)$ , où M est le nombre des eNodeB (macro et micro) et N est le nombre de terminaux mobiles. Pour surmonter cette difficulté, nous proposons une solution par un algorithme heuristique permettant de diminuer la complexité du problème. Les utilisateurs sont d'abord associés à l'eNodeB en se basant sur la valeur maximale de la puissance reçue (RX power). Ensuite, l'eNodeB j sera choisi pour servir le terminal mobile i, selon le critère suivant :

$$\max_{j \in eNBs} (GTP_{ij} - GTP_{current})$$

Où  $GTP_{current}$  représente la métrique GTP pour l'eNodeB courant auquel le terminal mobile est associé.

Conscient du dynamisme fort dans les réseaux mobiles (pour plusieurs raisons dont les variations de canal et la mobilité), la proposition doit garantir une stabilité contre l'effet Ping-pong. Ce dernier est un phénomène qui se produit quand le critère d'association ordonne au Terminal Mobile de changer d'association pour des changements minimes dans les critères utilisés. En effet, avec la fluctuation rapide des conditions radio, surtout en bordures des cellules, ou suite à l'apparition et la disparition d'obstacles mobiles par exemple (piétons, voitures, ...), les critères considérés peuvent varier instantanément dans un sens comme dans l'autre pour se retourner de nouveau après un court délai.

Afin d'éviter l'effet ping-pong et garantir une certaine stabilité dans le réseau, plusieurs approches existent dans la littérature. Parmi lesquelles nous pouvons citer l'utilisation de plusieurs seuils ou d'hystérésis pour la métrique de décision du handover. En effet, si nous considérons la puissance du signal reçu  $RSS_1$  comme métrique de décision, le Terminal Mobile ne décide de quitter l'eNodeB1 pour s'associer à l'eNodeB2 que lorsque le RSS de eNodeB1 devient inférieur à un seuil prédéfini  $RSS_{hres}$ . Une autre approche consiste à considérer la différence entre les deux métriques de décision, i.e.  $RSS_1 - RSS_2$  qui doit être supérieur à un seuil. Cette approche est meilleure que l'approche précédente en termes d'évitement de l'effet du ping-pong.

Nous proposons d'utiliser la deuxième approche présentée ci-dessus afin de minimiser le nombre de handover inutiles. Ainsi, nous enrichissons notre proposition par la condition suivante qui doit être vérifiée avant chaque réassociation:

$$GTP_{ij} - GTP_{current} > \varepsilon$$

La valeur de  $\varepsilon$  sera déterminée et fixée de sorte à réaliser le meilleur compromis efficacité énergétique/QoS.

### V.3.3 Evaluation de Performances

Pour évaluer les performances de l'approche proposée, nous avons conduit différentes simulations pour étudier et analyser le comportement de l'algorithme en termes de QoS et d'efficacité énergétique. Des comparaisons avec des approches existantes ont également été effectuées.

#### V.3.3.1 Environnement et paramètres de simulation

Nous avons considéré une macro cellule dont la couverture est de 1 km. Sur cette même zone, trois Micro-Cellules, chacune ayant un rayon de 300 mètres, sont déployées en bordure de cellule. Les utilisateurs se déplacent dans la zone suivant le modèle de mobilité Random Walk [97]. L'algorithme d'ordonnancement considéré est le Proportional Fair (cf. section V.4.1). Les paramètres de simulation les plus significatifs sont détaillés sur le Tableau 13.

Paramètre	Valeur
Bande passante	10 MHz
Nombre de Micro Cellules	3
Rayon de la Macro Cellule	1 km
Rayon des Micro Cellules	200 mètres
Nombre de secteurs dans la Macro Cellule	3
Algorithme d'ordonnancement	Proportional Fair
Modèle de trafic	Full Buffer
Type du trafic	242 kbps vidéo streaming
Modèle de mobilité des utilisateurs	Random Walk
Vitesse de déplacement des utilisateurs	3km/h
Modèle de Pathloss pour la Macro Cellule	$128.1 + 37.6 \log_{10}(d)$ (d en kilomètres)
Modèle de Pathloss pour la Micro Cellule	$24 + 45 \log_{10}(d + 20)$

Tableau 13 : Paramètres de simulation (LTE-SIM)

Les simulations ont été conduites sur le simulateur LTE-Sim [98]. C'est un simulateur dédié aux réseaux LTE hétérogènes. Il intègre plusieurs aspects dont l'accès universel Evolved Radio Terrestre (E-UTRAN) et le System Evolved Packet core (EPS). Il prend en charge plusieurs autres aspects tels que les environnements hétérogènes mono et multicellulaires, la gestion de la QoS, l'environnement multi-utilisateurs, plusieurs modèles de mobilité des utilisateurs (Manhatan, Random Waypoint,

Random Direction, Random Walk), les procédures du handover et les techniques de réutilisation de fréquence (frequency reuse). Quatre types de nœuds de réseau sont modélisés: les équipements utilisateur (UE), eNodeB (ENODEB), home eNodeB (HeNodeB), et de gestion de mobilité entité / passerelle (MME / GW). De même, quatre types différents de trafic sont mis en œuvre ainsi que la modulation et le codage adaptatif (AMC). Par ailleurs, plusieurs types d'ordonnanceurs sont implémentés dans le simulateur LTE-Sim dont l'algorithme PF (Proportional Fair).

### V.3.3.2 Résultats de performances

Nos premières simulations visent à déterminer une valeur optimale de  $\epsilon$  permettant de réaliser un compromis entre la conservation de puissance des eNodeB et la QoS. Cette dernière étant mesurée par le débit utile et le délai moyen de transmission. Pour se faire, nous avons considéré les paramètres décrits sur le Tableau 13.

Plusieurs simulations ont été déroulées. La valeur compromise qui se dégage pour  $\epsilon$  est autour de 0.15.

Dans la suite, nous allons considérer cette même valeur pour l'évaluation des performances.

Le mécanisme GTP sera évalué et comparé à deux algorithmes de référence : MaxRX et Pathloss Based (PL).

- **MaxRX** : C'est l'approche la plus basique. Les utilisateurs s'associent à la station de base ayant la plus grande puissance de transmission (RX power).
- **Pathloss based (PL)** : Dans cette approche, le critère de décision pour s'associer aux stations de bases considère le niveau de perte de propagation (Pathloss). Comparé au précédent, cet algorithme est plus adapté à la nature hétérogène des réseaux LTE HetNets.

La première évaluation concerne l'efficacité énergétique. Sur la Figure 24, nous présentons une comparaison des performances de notre approche avec les deux mécanismes de référence. La puissance moyenne consommée par l'ensemble des stations de base est présentée. Pour cette évaluation, nous avons fait varier le nombre d'utilisateurs dans la zone afin d'étudier le comportement face à la charge. Les résultats montrent que les choix d'association des utilisateurs avec l'approche proposée, basée sur le « Green Topological Potential », permet de diminuer sensiblement la consommation d'énergie dans le système comparée aux deux autres approches. Ceci démontre que notre solution favorise l'association des utilisateurs aux eNBs ayant des coûts énergétiques plus faibles (cf. V.3.1). A forte charge, l'approche MaxRX est encore plus pénalisante en termes d'énergie. Ceci s'explique par le fait que les terminaux, quel que soit leur localisation, reçoivent presque toujours les signaux les plus forts de la Macro-Cellule. Quant à l'approche basée sur les pertes de propagation, ses



performances sont, à forte charge, nettement meilleures que la technique MaxRX. Ceci s'explique qu'avec cette technique, un plus grand nombre d'utilisateurs s'associe aux Micro Cellules vu que les pertes de propagation sont mesurées de manière relative à la puissance d'émission et à la distance, ce qui favorise l'association de plus d'utilisateurs aux micro-stations.

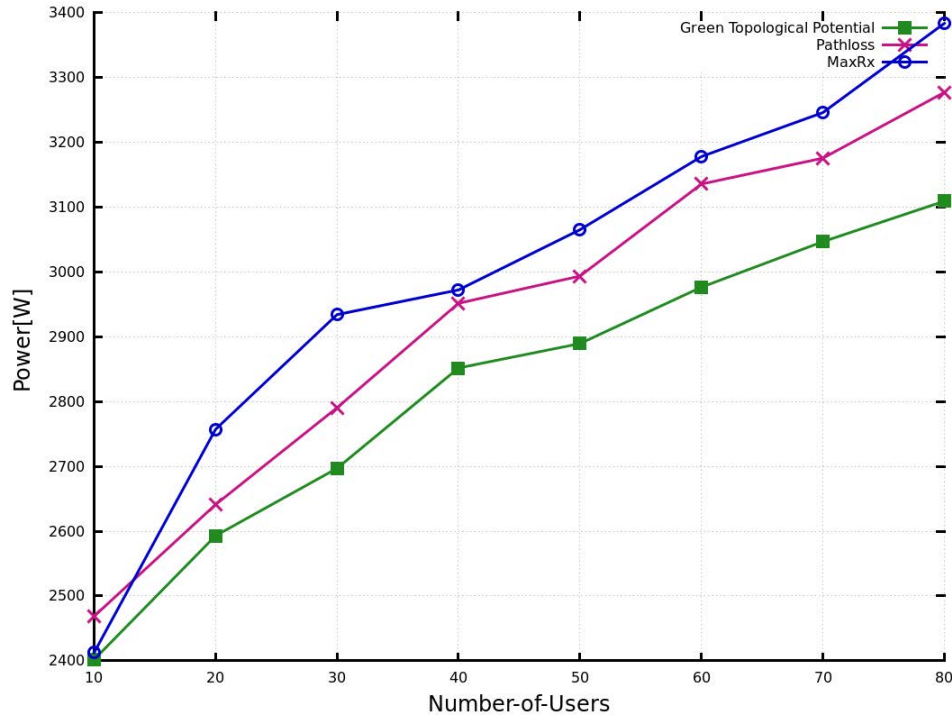


Figure 24: Diminution de la puissance moyenne de l'ensemble des stations de base avec et sans la métrique Green Topological Potential

La Figure 25 présente le débit utile moyen par utilisateur en fonction de la charge exprimée en termes du nombre d'utilisateurs. Nous constatons que le débit par utilisateur est inférieur à ceux obtenus avec les approches de référence. Ceci s'explique par le fait que si le nombre des handover entre les cellules augmente, la probabilité de perte des paquets durant la procédure du handover augmente aussi.

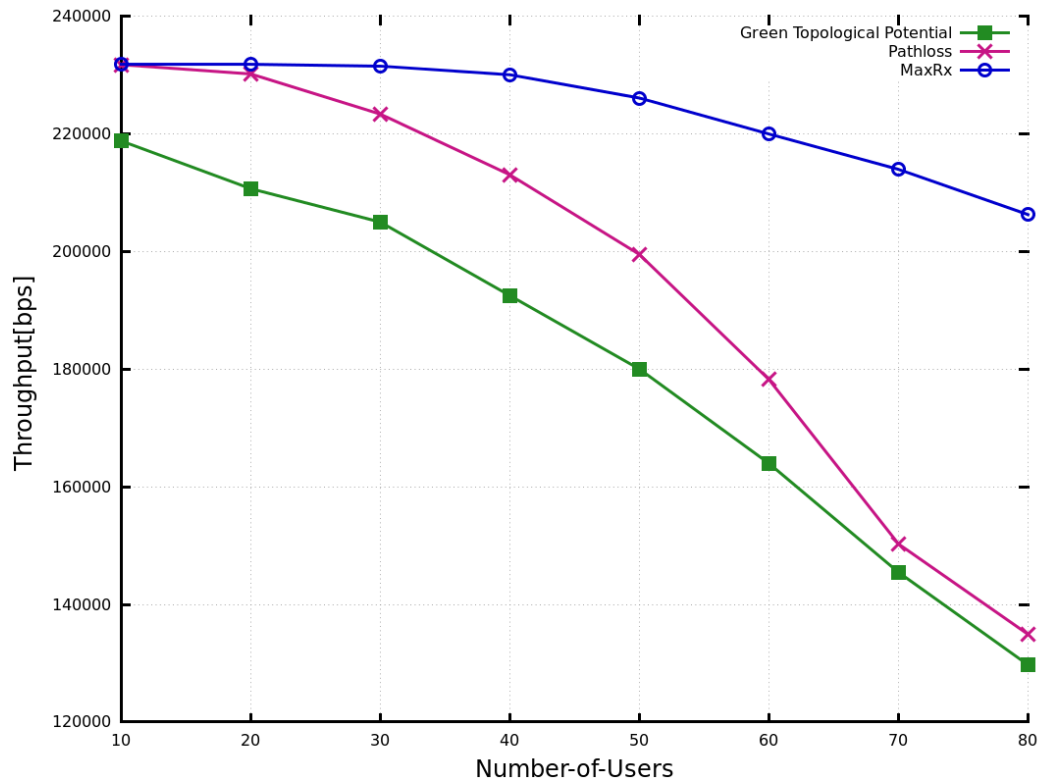


Figure 25: Débit utile moyen par utilisateur en fonction du nombre des utilisateurs

La Figure 26 représente le délai moyen de bout en bout par paquet (end to end packet delay). Nous constatons que le délai est légèrement plus augmenté quand on utilise la métrique proposée. Cependant, il faut noter que ces valeurs ne dépassent pas les 140 ms. Nous estimons que la différence des délais entre les deux mécanismes d'association est due au fait que le processus du handover augmente les délais. En effet, pour l'algorithme d'association des utilisateurs MaxRx, il y a moins de handover vers les micro cellules car ils sont effectués à une faible distance du micro eNodeB vu que la puissance d'émission d'un micro eNodeB est plus faible que celle des macro eNodeB (cf. Tableau 10).

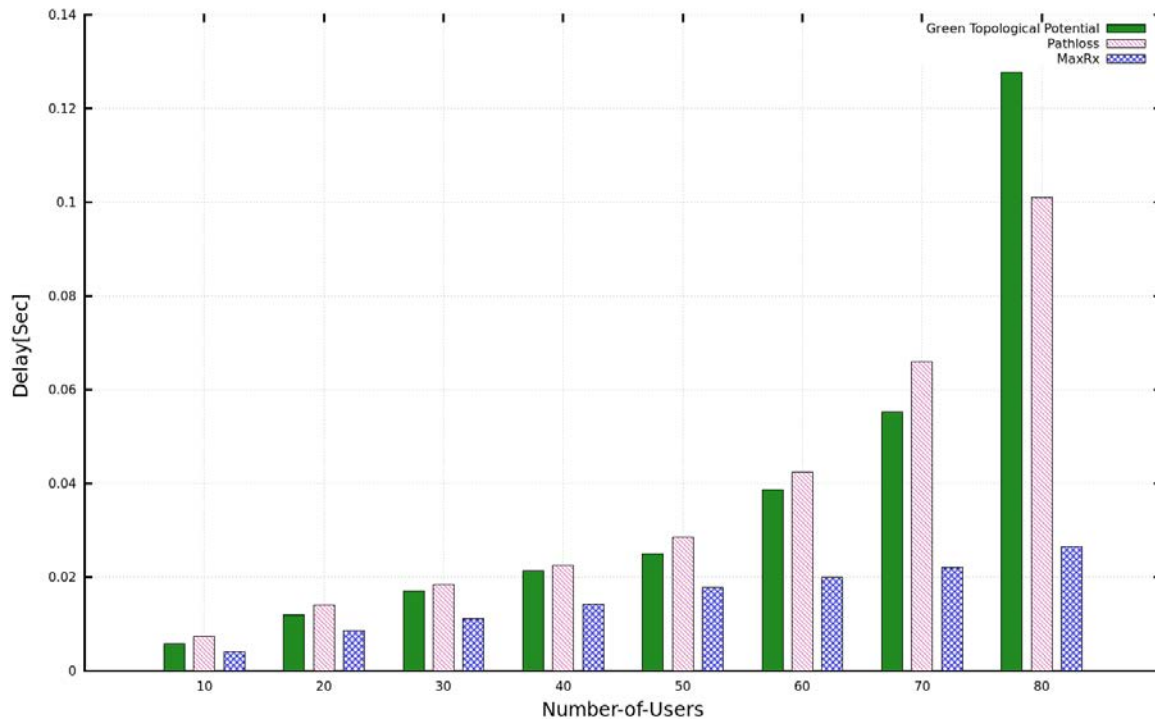


Figure 26: Délais moyens par utilisateur en fonction du nombre des utilisateurs

Comme métrique d'efficacité énergétique nous considérons la puissance par unité de surface proposée par l'ETSI et exprimée en  $\text{W}/\text{km}^2$  [60]. Cette mesure met l'accent sur la puissance totale du réseau (ou, de façon équivalente, la consommation totale d'énergie) et est étroitement liée aux émissions de  $\text{CO}_2$  et à l'empreinte carbone associée. En outre, étant donné que la zone de couverture  $A$ , pour laquelle le système doit être évalué, l'utilisation d'une constante prédéfinie évite l'utilisation d'un quotient de variables (e.g. énergie/bit). Ceci permet d'éviter des conclusions erronées vu que parfois, il est difficile de comprendre si l'augmentation de la métrique est due à l'augmentation du numérateur et / ou la diminution du dénominateur.

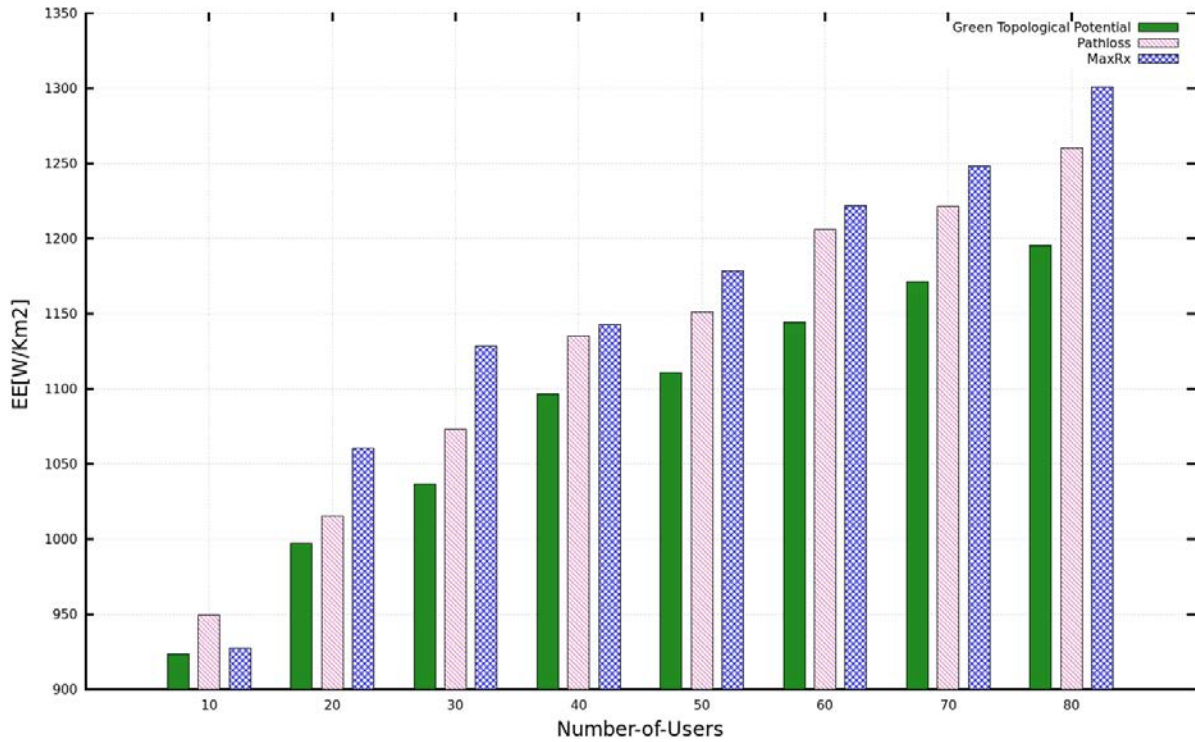


Figure 27: Comparaison de l'efficacité énergétique du réseau entre les différentes approches en fonction du nombre d'utilisateurs

La Figure 27 présente une comparaison de l'efficacité énergétique du réseau défini en tant que le rapport entre la puissance consommée et la surface de la zone considérée. Ces résultats montrent que notre approche est plus efficace énergétiquement en comparaison avec les algorithmes MaxRX et PL.

L'efficacité énergétique coté utilisateurs est illustrée sur la Figure 28. Elle représente le rapport entre l'énergie consommée, exprimée en Joule, et le débit utile exprimé en bps. Ces résultats montrent que notre approche est moins efficace énergétiquement pour l'utilisateur en comparaison avec les approches MaxRx et Pathloss Based. Ceci s'explique par le fait que suite aux pertes de paquets et à l'augmentation des délais, les utilisateurs passent plus de temps pour l'émission et la réception des données et par conséquent leurs énergies de transmission pourraient augmenter. Ainsi, avec notre approche les utilisateurs consommeraient légèrement plus d'énergie.

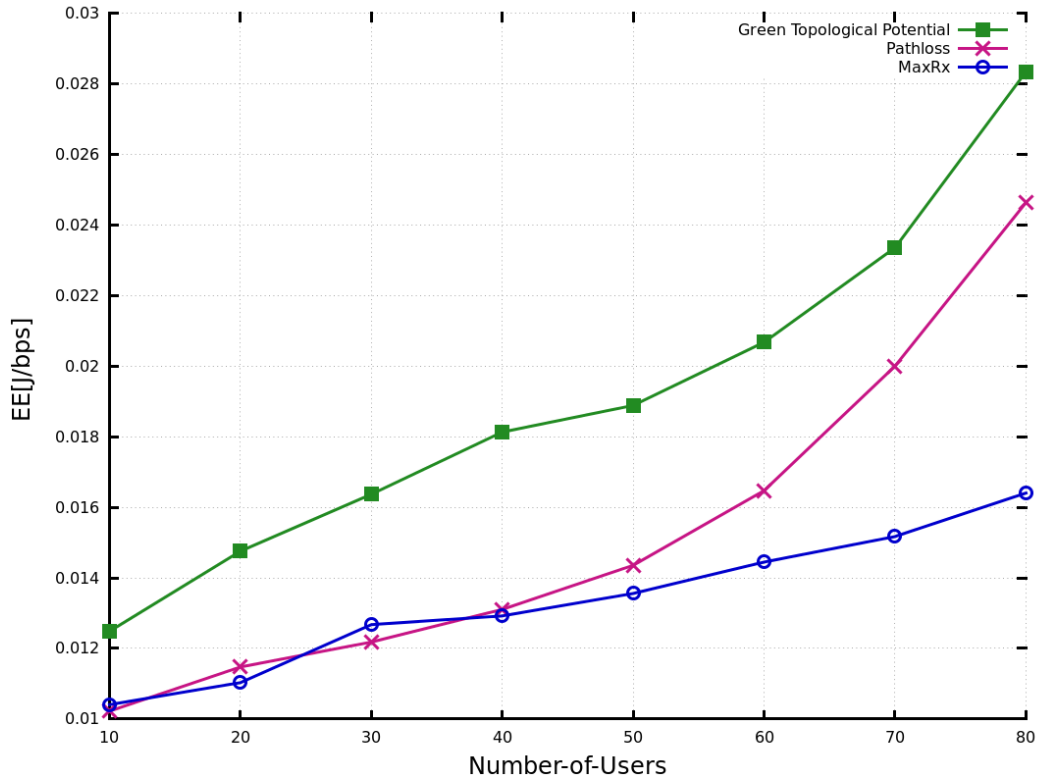


Figure 28: Comparaison de l'efficacité énergétique côté utilisateurs entre les différentes approches

## V.4 Contribution 4 : Ordonnancement DL : Analyse et Evaluation des performances énergétiques

Dans cette section nous proposons une évaluation de performances de quelques algorithmes d'ordonnancement sur la voix descendante pour les réseaux LTE. Cette évaluation concerne non seulement les performances de ces ordonnanceurs en termes de QoS tels que le débit et les taux d'erreurs binaires, elle comprend également une évaluation de leurs efficacités énergétiques.

### V.4.1 Algorithmes d'ordonnancement existants

#### V.4.1.1 Round Robin (RR)

La technique du Round Robin est une technique d'ordonnancement qui distribue équitablement les ressources radio entre les utilisateurs d'une cellule. Tous les utilisateurs ont le même débit et transmettent dans l'ordre la même quantité de données. Sur les réseaux radio, ce type d'ordonnancement n'est pas considéré comme étant efficace car il ne tient pas en compte des conditions radio de chaque utilisateur.

Généralement, le débit  $R_i$  d'un utilisateur  $i$  associé à une station de base  $j$  ayant une capacité  $R$  est proportionnel à la charge  $l_j$  de la station de base et est donné par :

$$R_i = \frac{R}{l_j}$$

#### V.4.1.2 Proportional Fair (PF)

L'algorithme d'ordonnancement PF est un algorithme intelligent qui permet de réaliser un équilibre efficacité/équité entre les utilisateurs, en allouant d'une façon opportuniste les ressources aux utilisateurs ayant de bonnes conditions de canal sans pour autant négliger et sacrifier ceux qui ont de mauvaises conditions. En effet, la métrique utilisée pour le choix de l'utilisateur à servir à chaque instant est inversement proportionnelle à l'historique de ce dernier en termes de débit. Par conséquent, un utilisateur ayant de mauvaises conditions radio et qui n'a pas été servi pendant un certain moment, aura également une chance pour transmettre. Mathématiquement, à chaque time slot TTI, l'algorithme d'ordonnancement PF choisi l'utilisateur  $k$  ayant la plus haute priorité, calculé en se basant sur :

$$k^* = \arg\max_k (R_k(t)/T_k(t))$$

Où

- $T_k(t)$  est le débit instantané de l'utilisateur  $k$ .
- $R_k(t)$  est le débit moyen calculé à l'instant  $t-1$  de l'utilisateur  $k$ .

#### V.4.1.3 Modified Largest Weighted Delay First (MLWDF)

Cet algorithme se base sur le même principe que le PF sauf qu'il prend en considération les exigences des différentes applications en termes de QoS. En effet la métrique de choix du PF est multipliée par un paramètre  $\alpha_k$  qui prend en considération le délai maximal  $\tau_k$  et la probabilité maximale  $\delta_k$  pour que le délai du premier paquet de la file d'attente ne dépasse pas  $\tau_k$ .

$$k^* = \arg\max_k \alpha_k \cdot D_{HOL,k} \cdot (R_k(t)/T_k(t))$$

Où

$D_{HOL,k}$  désigne le délai toléré par le flux.

$\alpha_k$  est donné par :

$$\alpha_k = -\log(\delta_k)/\tau_k$$

Ainsi ce type d'ordonnancement privilégie les flux temps réel et les utilisateurs ayant des bonnes conditions du canal radio.

#### V.4.1.4 Exponential Proportional Fair (EXP -PF)

Cet ordonnanceur donne plus de priorité aux flux temps réel ayant le plus grand délai tout en respectant les autres flux non temps réel. L'algorithme EXP-PF choisi l'utilisateur  $k$  pour lui allouer les ressources, via l'équation suivante :

$$k^* = \arg\max_k \beta_k(R_k(t)/T_k(t))$$

$\beta_k$  est donné par :

$$\beta_k = e^{\left(\frac{\alpha_k D_{\text{HOL},k} - X}{1 + \sqrt{X}}\right)}$$

Où

$$X = \frac{1}{N} \sum_k \alpha_k D_{\text{HOL},k}(t)$$

Où les symboles ont les mêmes significations que les précédents et  $N$  est le nombre des flux temps réel actifs dans le sens DL.

#### V.4.1.5 Max CQI

Cet ordonnanceur maximise le débit instantané en allouant le canal à l'utilisateur qui a les meilleures conditions radio :

$$k^* = \arg\max_k R_k(t)$$

L'avantage de cet ordonnanceur est qu'il augmente la capacité de la cellule ainsi que le débit de transmission pour les utilisateurs ayant des bonnes conditions canal. Cependant en terme d'équité, et contrairement au RR, le mécanisme Max CQI sert peu fréquemment les utilisateurs se trouvant dans la bordure de la cellule ou ayant des conditions radio médiocres. Il ne tient pas donc compte de l'équité entre les utilisateurs.

### V.4.2 Evaluation des algorithmes d'ordonnancement

Plusieurs travaux ont étudié la performance des différents algorithmes d'ordonnancement dans les réseaux LTE. Les métriques évaluées sont généralement la capacité des cellules et l'équité entre les utilisateurs. Cependant, de plus en plus de travaux d'évaluation portent sur l'aspect énergétique de ces ordonnanceurs [99], [100]. La plupart de ces travaux se sont intéressés aux ordonnanceurs PF, Max

CQI et RR. Le débit, l'énergie consommée ainsi que l'efficacité énergétique de ces trois ordonnanceurs de référence sont évalués et des conclusions similaires ont été tirés.

En effet, concernant l'aspect énergétique, l'ordonnanceur Max CQI est le plus efficace. La puissance consommée atteint sa plus grande valeur pour l'ordonnanceur RR. Concernant le débit, les évaluations ont montré que l'ordonnanceur Max CQI réalise le débit le plus élevé alors que pour le RR, le débit est détérioré. Tous ces travaux affirment que l'ordonnanceur PF est le meilleur ordonnanceur puisqu'il réalise un compromis entre l'efficacité énergétique, le débit et l'équité entre les utilisateurs.

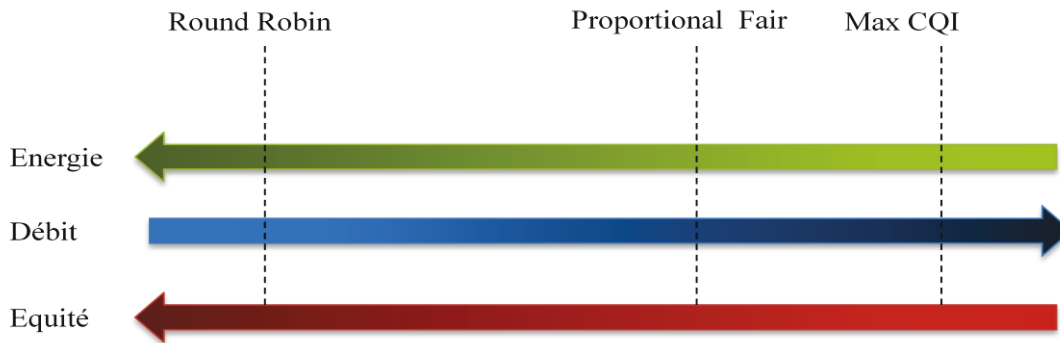


Figure 29: Performances des ordonnanceurs Max CQI, PF et RR

Plusieurs travaux ont donc proposé des versions améliorées de l'ordonnanceur PF. Parmi celles-ci nous pouvons citer MLWDF et EXP (détaillé dans la section précédente) qui prennent en considération la QoS des applications. Dans [101], les auteurs ont proposé une évaluation de ces deux algorithmes. Les performances de ces deux ordonnanceurs en termes de débit, d'équité et de taux de pertes de paquets ont été évaluées. Les résultats des simulations ont montré que l'algorithme MLWDF offre de meilleures performances comparé à EXP-PF pour des charges faibles avec un nombre d'utilisateurs allant de 50 à 160. Cependant, lorsque la charge augmente, les performances d'EXP-PF sont meilleures.

Nous proposons, dans la section suivante, une évaluation des performances des trois ordonnanceurs PF, MLWDF et EXP. Nous nous intéressons, en particulier, au comportement énergétique de ces trois ordonnanceurs.

#### V.4.2.1 Les métriques d'évaluation

Cette évaluation permet d'analyser et de comprendre le comportement de ces ordonnanceurs et peut être la base pour proposer un nouvel algorithme ou pour améliorer ceux existants. Les métriques utilisées pour l'évaluation sont les suivantes:



- Le débit utile par utilisateur : le débit utile correspond à la quantité de données utiles reçues par seconde.
- L'équité : L'équité de chaque ordonnanceur est exprimée en utilisant l'indice d'équité de Jain, exprimé dans [102]:

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^N R_i)^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N R_i^2}$$

Où  $N$  est le nombre d'utilisateurs et  $R_i$  est le débit de l'utilisateur  $i$

- L'efficacité énergétique côté réseau : L'efficacité énergétique, exprimée par le rapport puissance / débit, est évaluée.
- L'efficacité énergétique des terminaux mobiles : L'efficacité énergétique, exprimée par le rapport énergie moyenne de transmission par utilisateur / débit utile moyen par utilisateur, est évaluée.

#### V.4.2.2 Simulation et résultats

L'évaluation est réalisée en utilisant le simulateur système LTE-Sim (présenté dans la section V.3.3). Nous considérons la topologie de réseau suivante :

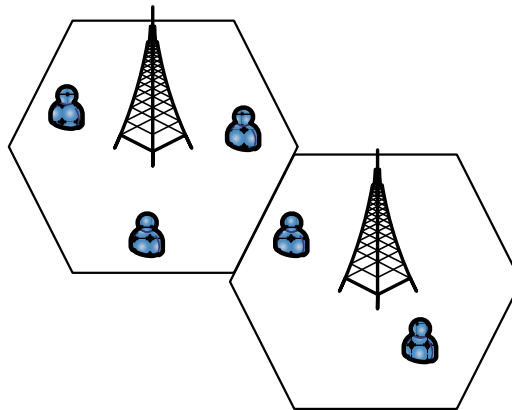


Figure 30: Topologie du réseau d'évaluation

L'environnement simulé est composé d'un réseau LTE avec deux cellules hexagonales. Dans chaque cellule,  $n$  utilisateurs sont en mobilité. Nous varions le nombre d'utilisateurs dans les cellules et le nombre de blocs de ressources physiques disponibles (en variant la bande passante du réseau).

Paramètre	Valeur
Bande passante	10-20 MHz
Types du trafic	VOIP, Best Effort
Modèle de mobilité	Random walk
Vélocité des utilisateurs	3Km/h
Technique d'accès	OFDMA
Algorithmes d'ordonnancement	PF, MLWDF, EXP-PF
Handover	oui

Tableau 14: Paramètres de simulation

Les résultats de simulations sont présentés sur les figures 31 à 36.

Nous avons considéré deux types de trafics :

- Trafic Temps réel (VOIP)
- Trafic Best Effort (Infinite-buffer)

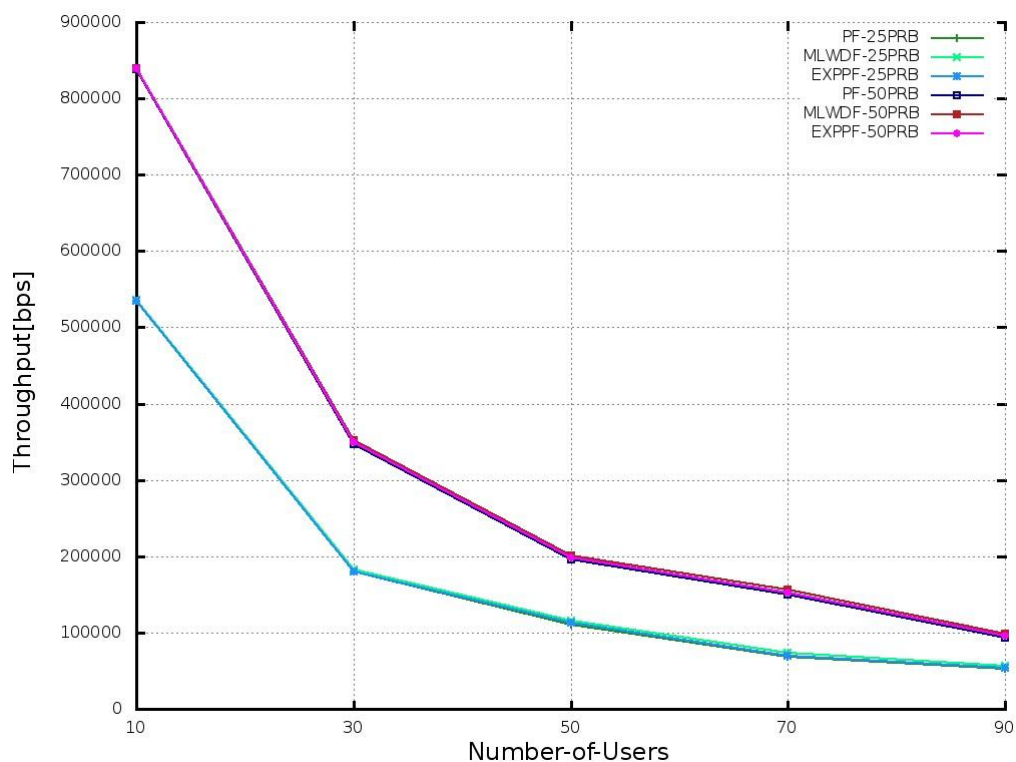


Figure 31: Débit moyen par utilisateur pour les flux BE

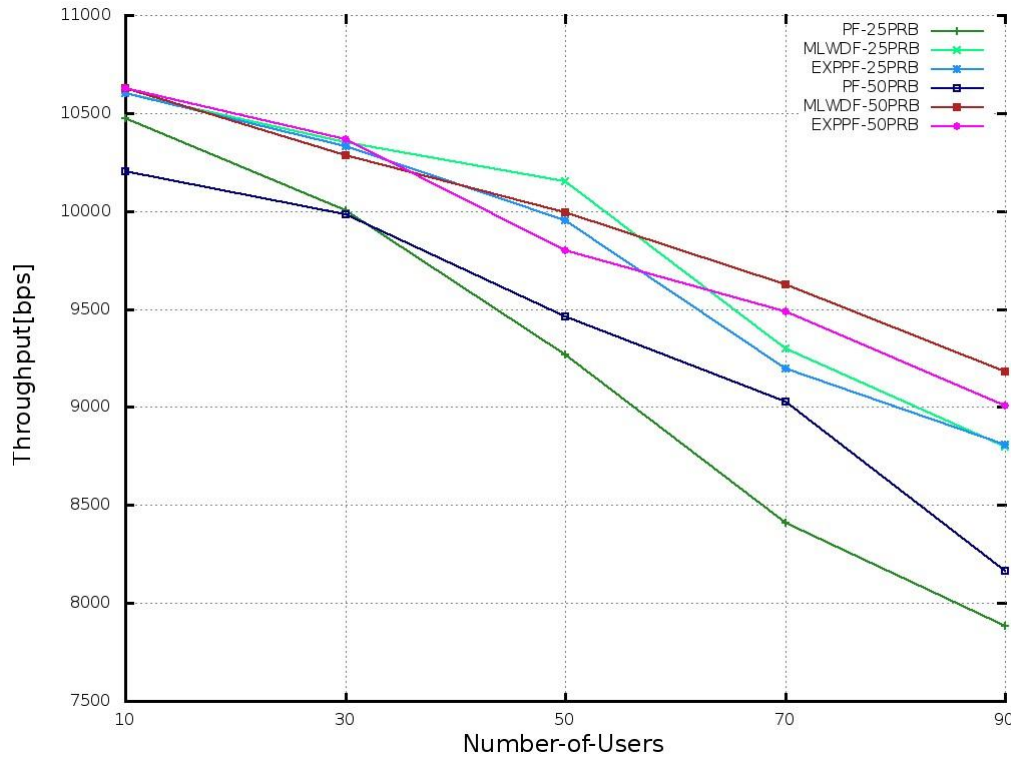


Figure 32: Débit moyen par utilisateur pour les flux RT

Les Figure 32 et 32 représentent le débit utile moyen par utilisateur pour les trois ordonnanceurs pour les deux types de trafics (RT et BE). Nous avons fait varier deux paramètres : le nombre de blocs de ressources disponibles (50 ou 100 PRBs) et le nombre d'utilisateurs (de 10 à 90). Les résultats des simulations montrent que pour les services temps réel (RT) et qu'à forte charge, l'ordonnanceur MLWDF offre des débits plus importants comparé aux algorithmes EXP-PF et PF. Cependant, pour les flux best effort (BE), les trois ordonnanceurs offrent des débits équivalents, ceci s'explique par le fait qu'ils ont un comportement similaire pour le trafic non temps réel. Lorsque le nombre d'utilisateurs augmente dans la cellule, les débits pour les trois ordonnanceurs diminuent considérablement.

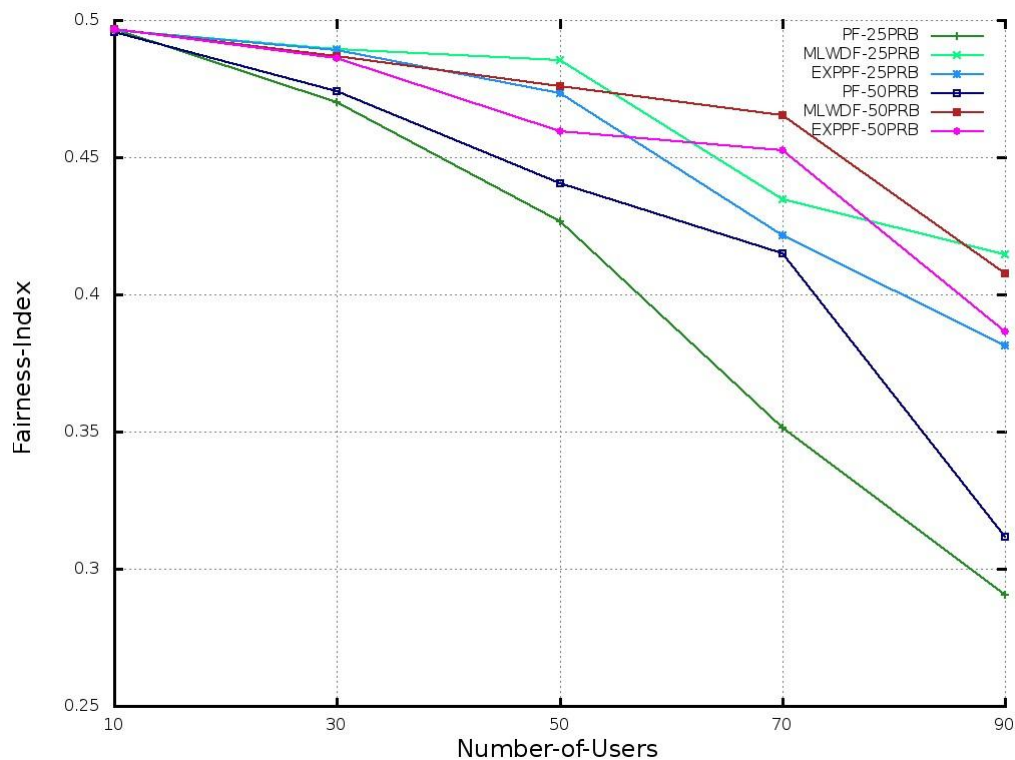


Figure 33: Indicateur d'équité « Jain Fairness Index » pour les flux RT

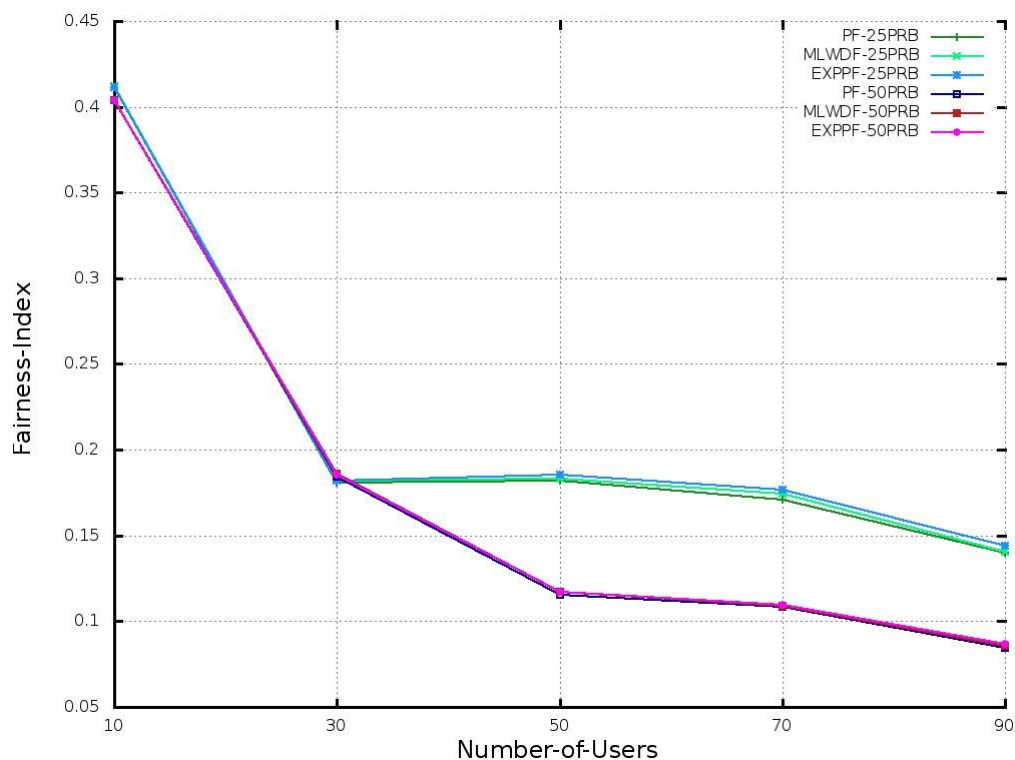


Figure 34: Indicateur d'équité « Jain Fairness Index » pour les flux BE

Pour mesurer l'équité des algorithmes d'ordonnancement, nous avons utilisé l'index d'équité Jain. Les figures 33 et 34 présentent l'équité des ordonnanceurs évaluée en fonction du nombre

d'utilisateurs. Nous constatons que pour les flux VOIP, indépendamment du nombre de blocs de ressources disponibles, l'ordonnanceur PF est le moins équitable et que MLWDF a l'indice d'équité le plus important. Cependant, pour les flux BE, le comportement des trois ordonnanceurs en termes d'équité est similaire.

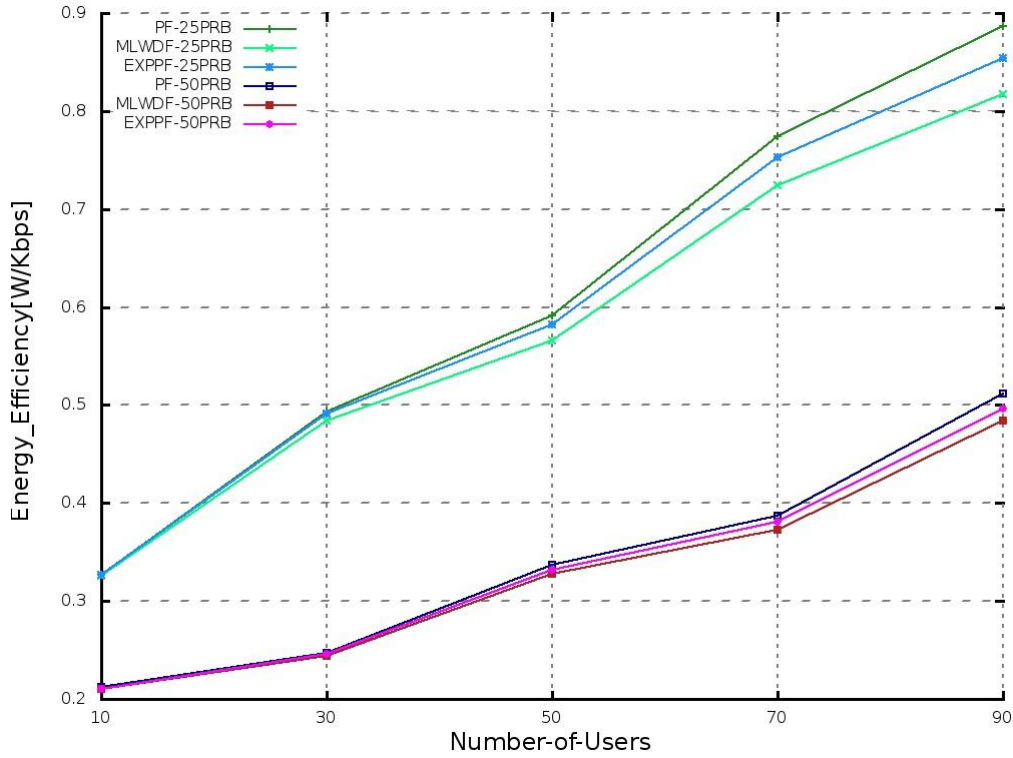


Figure 35: Efficacités énergétique [W/Kbps]

L'efficacité énergétique de l'ensemble des cellules est présentée sur la Figure 35.

Nous considérons la définition de l'efficacité énergétique donnée dans [95] et qui permet d'évaluer la puissance consommée par les eNodeBs par rapport au débit binaire offert dans la cellule:

$$EE = \frac{\text{Puissance consommée}}{\text{Débit offert}} \text{ exprimée en (W/Kbps)}$$

Avec cette formulation, plus la valeur de EE est faible, plus l'efficacité énergétique est importante.

La Figure 35 montre qu'en faisant varier la charge, l'efficacité énergétique diminue pour les trois ordonnanceurs. Cette diminution est due au fait que lorsque le débit atteint sa capacité maximale, la puissance consommée par l'eNodeB continue à augmenter en fonction de la charge. La puissance d'émission, qui dépend de la charge, augmente et devient prédominante et l'efficacité énergétique continue donc de décroître légèrement. Ces résultats montrent que MLWDF est le plus efficace énergétiquement en comparaison avec PF et EXP-PF.

Nous constatons que lorsque le nombre de PRB augmente, les trois ordonnanceurs deviennent plus efficaces énergétiquement. Ceci s'explique par le fait que, dans ces conditions, le débit utile dans la cellule augmente. Cependant, il faut noter que l'ordonnanceur PF est moins efficace énergétiquement pour les deux largeurs de bandes considérées.

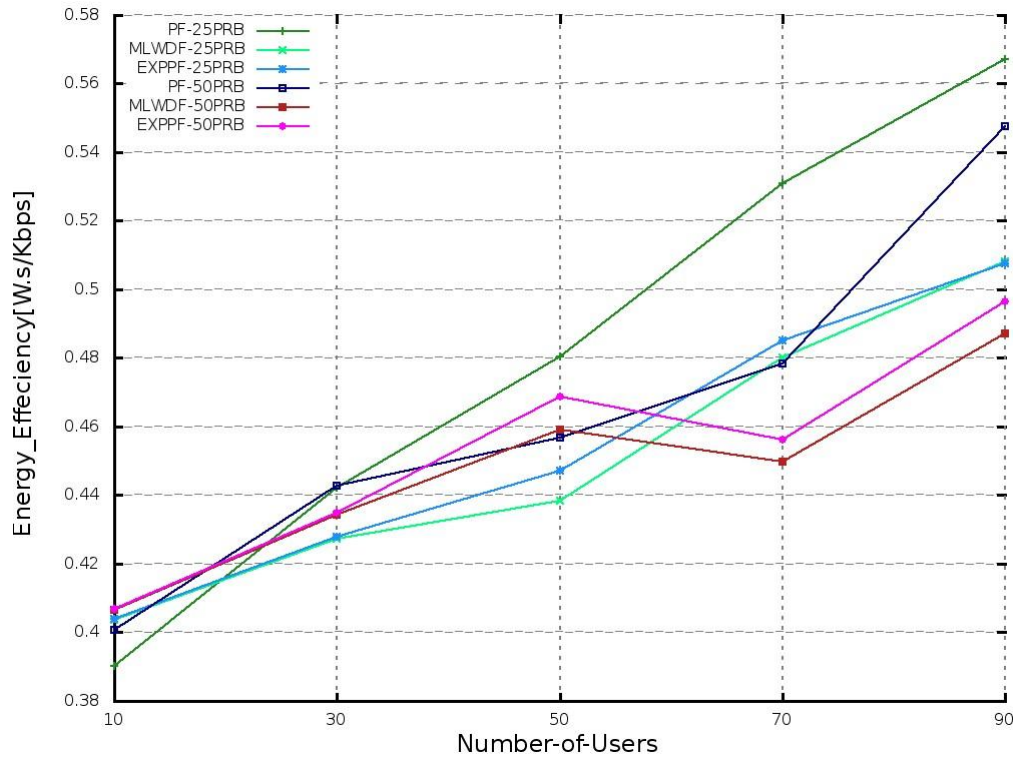


Figure 36: Energie de transmission moyenne par utilisateur

La Figure 36 illustre l'efficacité énergétique de transmission par utilisateur exprimée en  $W.s/Kbps$ . Les utilisateurs servis en utilisant l'algorithme d'ordonnancement PF consomment plus d'énergie par Kbps que ceux servis par les deux autres ordonnanceurs. Ceci est dû au fait que le débit utile est moins important pour l'algorithme PF et donc les utilisateurs passent plus de temps en transmission. Cependant, l'efficacité énergétique des utilisateurs servis par l'algorithme MLWDF est plus importante que celles des utilisateurs servis par les PF et EXP-PF, et cette différence augmente en fonction des ressources disponibles.

#### V.4.2.1 Synthèse

Les résultats de cette évaluation ont montré que l'ordonnanceur MLWDF est le plus efficace en termes de QoS, d'équité et d'énergie et que l'algorithme d'ordonnancement PF est moins efficace énergétiquement et offre un débit beaucoup moins important que les autres ordonnanceurs. Cette différence de comportement est amplifiée lorsque le nombre d'utilisateurs dans les cellules augmente.

Cette évaluation permet de comparer les algorithmes d'ordonnancement et d'analyser l'impact de ces algorithmes sur l'énergie consommée par les utilisateurs. Ces algorithmes cherchent à réaliser l'équité entre les utilisateurs en termes de QoS (débit, délai etc.). Cependant, l'une des contraintes des terminaux mobiles aujourd'hui est la capacité limitée de la batterie face à un trafic de donnée en croissance continue. Tenir compte de l'état de la batterie peut réaliser une certaine équité énergétique entre les utilisateurs. Dans la section suivante nous présentons une proposition d'algorithme d'ordonnancement dont le but est de diminuer la consommation d'énergie des utilisateurs ayant un niveau de batterie faible.

### Energy Efficient Weighted PF scheduling algorithm

Nous proposons un algorithme d'ordonnancement en partant du principe de l'ordonnanceur PF et en attribuant de plus grande priorité aux utilisateurs ayant une charge de batterie plus faible.

A chaque TTI, l'utilisateur  $k$  à servir est choisi comme suit :

$$k^* = \operatorname{argmax}_k ((R_k(t))/T_k(t) + \alpha_k)$$

Où

- $\alpha_k$  est un poids attribué aux utilisateurs en fonction de leurs niveaux de batterie.

$\alpha_k = 1/C_k$  avec  $C_k$  est la capacité restante de la batterie en pourcentage

- $T_k(t)$  est le débit instantané de l'utilisateur  $k$
- $R_k(t)$  est le débit moyen calculé à l'instant  $t-I$ .

Nous supposons que l'utilisateur rend un feedback à la station de base de son état énergétique actuel similaire à l'indicateur CQI, PLI (Power level Indicator). Ceci peut améliorer l'expérience des utilisateurs en termes de consommation d'énergie. Ainsi, un utilisateur ayant un niveau de batterie faible a plus de chance d'être servi par la station de base.

## V.5 Conclusions

Face à l'évolution des usages et l'augmentation continue du trafic de données, les architectures des réseaux cellulaires se sont vu enrichir par des petites cellules permettant d'améliorer la qualité d'expérience des utilisateurs en offrant des débits plus élevés et en améliorant la couverture. Cependant, ces nouveaux réseaux, dits hétérogènes, peuvent augmenter les niveaux de puissance consommée sur les terminaux et de façon générale sur le réseau.

En effet, la gestion des utilisateurs (association) et des flux (ordonnancement), sur ces architectures hétérogènes, nécessite de nouvelles approches basées sur la connaissance fine d'un contexte de plus en plus riche et non uniforme.

Dans ce chapitre nous avons proposé une nouvelle solution d'association dynamique des utilisateurs sur un environnement de réseaux d'accès LTE hétérogènes tenant compte des contraintes énergétiques. Notre approche est basée sur la mesure d'un potentiel topologique enrichie que nous avons dénoté GTP (*Green Topological Potential*). Cette dernière permet de réaliser un compromis entre les efficacités spectrales, communément utilisées, et l'efficacité énergétique. Les performances de l'approche proposée montrent qu'un gain non négligeable de puissance peut être atteint tout en gardant des niveaux de QoS acceptables.

Nous avons ensuite proposé une évaluation des performances de trois algorithmes d'ordonnancement de paquets (EXP-PF, MLWDF et PF). Pour ces évaluations, nous avons considéré trois critères mariant la QoS, l'équité et l'efficacité énergétique. Les résultats de ces études montrent que, en cas de forte charge, les performances des ordonnanceurs EXP-PF et MLWDF devancent celles du PF sur les trois critères. Ces résultats peuvent être la base pour proposer des améliorations sur des algorithmes existants ou encore pour proposer de nouveaux ordonnanceurs plus efficaces énergétiquement.



## VI. Conclusions et Perspectives

Dans cette thèse nous nous sommes intéressés à la problématique de l'optimisation de la consommation d'énergie dans le domaine des TIC et plus particulièrement les réseaux d'accès sans fil hétérogènes. Ces travaux rentrent dans le cadre des études et travaux visant à minimiser l'empreinte carbone de nos activités et pour préserver les richesses naturelles aux générations futures.

L'analyse du contexte général et de l'état de l'art présentée dans les chapitres I et II, montre que malgré la richesse des travaux existants, il reste beaucoup à faire en termes d'optimisations techniques et architecturale. Ceci est du à l'évolution continue des technologies et architectures réseaux, des services proposés et de la forte pénétration des usages en mobilité.

Notre première contribution a concerné l'optimisation de l'énergie de transmission des terminaux mobiles. Nous avons proposé dans le chapitre III un algorithme d'ordonnancement de paquets pour la voie montante en considérant des terminaux mobiles multimodaux. Cet algorithme permet de sélectionner pour chaque paquet l'interface qui permet de préserver au mieux l'énergie du mobile tout en respectant les contraintes liées à la QoS.

Nous avons ensuite analysé et montré que l'énergie consommée par les interfaces radio dans les états autres que ceux de transmission (i.e. en veille) n'est pas négligeable. De ce fait nous nous sommes intéressés à la gestion globale des interfaces radio afin de diminuer encore plus la consommation d'énergie des terminaux. Nous avons en premier lieu analysé les modèles énergétiques existants afin d'en tirer des règles. A partir de ces modèles et règles, nous avons ensuite proposé une solution globale pour la gestion des interfaces au niveau des terminaux mobiles permettant d'une part de minimiser la consommation d'énergie lors des périodes d'inactivité, d'autre part de minimiser la consommation d'énergie d'activité en sélectionnant l'interface la plus adéquate pour les flux de données en cours.

Dans le chapitre IV, nous avons considéré la problématique de l'association des utilisateurs dans les réseaux LTE hétérogènes. Nous avons proposé le mécanisme GTP (Green Topological Potential) pour l'association dynamique des utilisateurs minimisant la consommation de puissance totale du réseau d'accès et réalisant un compromis énergie/efficacité spectrale. Les modèles énergétiques dédiés à

chaque type de station de base (i.e. macro, micro) ont été pris en compte. Pour l'évaluation des performances on s'est basé sur une valeur de  $\varepsilon$  qu'on peut raffiner en fonction du nombre d'utilisateurs. Les résultats des simulations ont montré que l'efficacité énergétique de la zone considérée augmente avec notre mécanisme GTP. Cependant, l'utilisation des micro-eNodeBs augmente la consommation de puissance en comparaison avec le cas où seul un macro-eNodeB est considéré. Cette augmentation est due au coût énergétique fixe des micro-eNodeBs. Un axe de recherche intéressant est donc proposé une solution qui optimise l'association des utilisateurs et diminue ce coût fixe en mettant en veille les micro-eNodeBs selon leurs charges.

La dernière partie de la thèse a été consacré à l'évaluation d'un certain nombre d'ordonnanceurs en termes d'efficacité énergétique. Ce travail est les prémisses d'une première perspective de recherche que nous visant afin de proposer un algorithme d'ordonnancement efficace énergétiquement. Nous avons entamé dans ce chapitre la proposition d'un mécanisme d'ordonnancement basé sur le PF et intégrant un nouveau critère qui renseigne sur le niveau de batterie disponible. Ce mécanisme a pour objectif de favoriser les terminaux ayant des contraintes énergétiques fortes (niveau de batterie faible) tout en continuant à préserver un certain niveau d'équité.

Un autre axe de recherche que nous envisageons concerne la combinaison de plusieurs des solutions proposées afin de minimiser la consommation d'énergie de façon simultanée sur les terminaux et les réseaux. Cette solution combinerai l'association dynamique des utilisateurs, l'ordonnancement DL et UP. Elle nécessitera certainement des propositions architecturales et de signalisation.

## Bibliographie

- [1] « SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age ». [En ligne]. Disponible sur: [www.smart2020.org/\\_assets/files/02\\_Smart2020Report.pdf](http://www.smart2020.org/_assets/files/02_Smart2020Report.pdf), consulté le 31 Juillet 2014.
- [2] « Global Action Plan », 2012. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.globalactionplan.org.uk/>, consulté le 31 Juillet 2014.
- [3] H. BREUIL, D. BURETTE, B. FLURY-HERARD, J. CUEUGNIET, D. VIGNOLLES, et H. BOISSON, « TIC et développement durable ». 2008.
- [4] « European Union Funded Projects Information in Green Networks ». [En ligne]. Disponible sur: [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/sustainable\\_growth/funding/prj\\_ict-systems/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/sustainable_growth/funding/prj_ict-systems/index_en.htm), consulté le 31 Juillet 2014.
- [5] GFI, « fit4green ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fit4green.eu/>, consulté le 31 Juillet 2014.
- [6] « all4green ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.all4green-project.eu/description>, consulté le 31 Juillet 2014.
- [7] « coolemall ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.coolemall.eu/>, consulté le 31 Juillet 2014.
- [8] « Cognitive Radio and Cooperative strategies for Power saving in multi-standard wireless devices (C2POWER) ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.ict-c2power.eu/>, consulté le 31 Juillet 2014.
- [9] « Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ict-earth.eu/>, consulté le 31 Juillet 2014.
- [10] IEEE, « Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications », IEEE Std 802.11, 1997.
- [11] IEEE, « Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band », IEEE Std 802.11b-1999, 1999.
- [12] IEEE, « Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band », IEEE Std 802.11a, 1999.

- [13] IEEE, « Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band », IEEE Std 802.11g, 2003.
- [14] IEEE, « Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput », IEEE P802.11n<sup>TM</sup>/D11.0, 2009.
- [15] IEEE, « Specification framework for TGac. », IEEE P802.11ac, janv. 2011.
- [16] R. R. Stewart, D. Otis, et J. Stone, « Stream Control Transmission Protocol (SCTP) Checksum Change », 2002.
- [17] K. Rojviboonchai, T. Osuga, et H. Aida, « R-M/TCP: protocol for reliable multi-path transport over the Internet », in *19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2005. AINA 2005*, 2005, vol. 1, p. 801-806 vol.1.
- [18] D. Farinacci, D. Lewis, D. Meyer, et V. Fuller, « The Locator/ID Separation Protocol (LISP) ». [En ligne]. Disponible sur: <http://tools.ietf.org/html/rfc6830>. [Consulté le: 15-juin-2014].
- [19] T. Kelly, « The 4A vision: anytime, anywhere, by anyone and anything », 08-déc-2005.
- [20] « Self-Organizing Networks (SON); Concepts and requirements », 3GPP, TS 32.500, V11.1.0, 2011.
- [21] « Telecommunication management; Automatic Neighbour Relation (ANR) management; Concepts and requirements », 3GPP, TS 32.511.
- [22] « Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description », 3GPP, TS 36.300.
- [23] T. Janevski, « 5G Mobile Phone Concept », 2009, p. 1-2.
- [24] « Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification », 3GPP, ETSI TS 125 331.
- [25] « LTE Radio Layer 2, RRC and Radio Access Network Architecture », 3GPP, 3. REV-090004, 2010.
- [26] D. Rajan et C. Poellabauer, « Adaptive Fragmentation for Latency Control and Energy Management in Wireless Real-time Environments », in *International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications, 2007. WASA 2007*, 2007, p. 158-168.

- [27] K.-C. Ting, F.-C. Kuo, B.-J. Hwang, H.-C. Wang, et F. Lai, « An Accurate Power Analysis Model Based on MAC Layer for the DCF of 802.11n », in *2010 International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications (ISPA)*, 2010, p. 350-358.
- [28] G. Bianchi, « Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function », *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, n° 3, p. 535-547, mars 2000.
- [29] L. M. Feeney et M. Nilsson, « Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment », in *IEEE INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings*, 2001, vol. 3, p. 1548-1557 vol.3.
- [30] Y. Xiao, P. Savolainen, A. Karppanen, M. Siekkinen, et A. Ylä-Jääski, « Practical Power Modeling of Data Transmission over 802.11G for Wireless Applications », in *Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking*, New York, NY, USA, 2010, p. 75-84.
- [31] D. Halperin, B. Greenstein, A. Sheth, et D. Wetherall, « Demystifying 802.11N Power Consumption », in *Proceedings of the 2010 International Conference on Power Aware Computing and Systems*, Berkeley, CA, USA, 2010, p. 1-.
- [32] N. Warty, R. K. Sheshadri, W. Zheng, et D. Koutsonikolas, « A First Look at 802.11N Power Consumption in Smartphones », in *Proceedings of the First ACM International Workshop on Practical Issues and Applications in Next Generation Wireless Networks*, New York, NY, USA, 2012, p. 27-32.
- [33] J.-H. Yeh, J.-C. Chen, et C.-C. Lee, « Comparative Analysis of Energy-Saving Techniques in 3GPP and 3GPP2 Systems », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, n° 1, p. 432-448, janv. 2009.
- [34] L. Wang, A. Ukhanova, et E. Belyaev, « Power consumption analysis of constant bit rate data transmission over 3G mobile wireless networks », in *2011 11th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, 2011, p. 217-223.
- [35] B. Zhao, Q. Zheng, G. Cao, et S. Addepalli, « Energy-Aware Web Browsing in 3G Based Smartphones », in *Proceedings of the 2013 IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems*, Washington, DC, USA, 2013, p. 165-175.
- [36] H. Petander, « Energy-aware Network Selection Using Traffic Estimation », in *Proceedings of the 1st ACM Workshop on Mobile Internet Through Cellular Networks*, New York, NY, USA, 2009, p. 55-60.

- [37] Y. Xiao, R. S. Kalyanaraman, et A. Yla-Jaaski, « Energy Consumption of Mobile YouTube: Quantitative Measurement and Analysis », in *The Second International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, 2008. NGMAST '08*, 2008, p. 61-69.
- [38] N. Balasubramanian, A. Balasubramanian, et A. Venkataramani, « Energy Consumption in Mobile Phones: A Measurement Study and Implications for Network Applications », in *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference*, New York, NY, USA, 2009, p. 280-293.
- [39] G. P. Perrucci, F. H. P. Fitzek, et J. Widmer, « Survey on Energy Consumption Entities on the Smartphone Platform », in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*, 2011, p. 1-6.
- [40] A. R. Jensen, M. Lauridsen, P. Mogensen, T. B. Sørensen, et P. Jensen, « LTE UE Power Consumption Model: For System Level Energy and Performance Optimization », in *2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012, p. 1-5.
- [41] A. Calhan et C. Ceken, « Speed sensitive-energy aware adaptive fuzzy logic based vertical handoff decision algorithm », in *2011 18th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, 2011, p. 1-4.
- [42] A. Rahmati et L. Zhong, « Context-Based Network Estimation for Energy-Efficient Ubiquitous Wireless Connectivity », *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 10, n° 1, p. 54-66, janv. 2011.
- [43] C. Desset, N. Ahmed, et A. Dejonghe, « Energy Savings for Wireless Terminals through Smart Vertical Handover », in *IEEE International Conference on Communications, 2009. ICC '09*, 2009, p. 1-5.
- [44] D. Xenakis, N. Passas, L. Di Gregorio, et C. Verikoukis, « A Context-Aware Vertical Handover Framework Towards Energy-Efficiency », in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*, 2011, p. 1-5.
- [45] E. Shih, P. Bahl, et M. J. Sinclair, « Wake on Wireless: An Event Driven Energy Saving Strategy for Battery Operated Devices », in *Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, New York, NY, USA, 2002, p. 160-171.
- [46] G. Perrucci, F. Fitzek, G. Sasso, et M. Katz, « Energy saving strategies for mobile devices using wake-up signals », in *MobiMedia-4th International Mobile Multimedia Communications Conference, Oulu-Finland*, 2008.

- [47] N. Nie, C. Comaniciu, et P. Agrawal, « A Game Theoretic Approach to Interference Management in Cognitive Networks », in *Wireless Communications*, P. Agrawal, P. J. Fleming, L. Zhang, D. M. Andrews, et G. Yin, Éd. Springer New York, 2007, p. 199-219.
- [48] F. Meshkati, H. V. Poor, S. C. Schwartz, et N. B. Mandayam, « An energy-efficient approach to power control and receiver design in wireless data networks », *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, n° 11, p. 1885-1894, nov. 2005.
- [49] M. Deruyck, W. Joseph, et L. Martens, « Power consumption model for macrocell and microcell base stations », *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 25, n° 3, p. 320-333, mars 2014.
- [50] M. Deruyck, D. De Vulder, W. Joseph, et L. Martens, « Modelling the power consumption in femtocell networks », in *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 2012, p. 30-35.
- [51] G. Auer, V. Giannini, C. Desset, I. Godor, P. Skillermark, M. Olsson, M. A. Imran, D. Sabella, M. J. Gonzalez, O. Blume, et A. Fehske, « How much energy is needed to run a wireless network? », *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 18, n° 5, p. 40-49, oct. 2011.
- [52] G. Micallef, P. Mogensen, et H.-O. Sheck, « Cell size breathing and possibilities to introduce cell sleep mode », in *Wireless Conference (EW), 2010 European*, 2010, p. 111-115.
- [53] S.-E. Elayoubi, L. Saker, et T. Chahed, « Optimal control for base station sleep mode in energy efficient radio access networks », in *2011 Proceedings IEEE INFOCOM*, 2011, p. 106-110.
- [54] L. Saker, S.-E. Elayoubi, R. Combes, et T. Chahed, « Optimal Control of Wake Up Mechanisms of Femtocells in Heterogeneous Networks », *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, n° 3, p. 664-672, avr. 2012.
- [55] G. Miao, N. Himayat, G. Y. Li, et S. Talwar, « Low-Complexity Energy-Efficient Scheduling for Uplink OFDMA », *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, n° 1, p. 112-120, janv. 2012.
- [56] S. Videv, J. S. Thompson, H. Haas, et P. M. Grant, « Resource allocation for energy efficient cellular systems », *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2012, n° 1, p. 1-15, déc. 2012.
- [57] G. Xinyu, J. Shucong, L. Wenyu, et Z. Lin, « Energy efficient load balancing in LTE self-organization networks », in *2013 IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops)*, 2013, p. 96-100.

- [58] I.-H. Hou et C. S. Chen, « An Energy-Aware Protocol for Self-Organizing Heterogeneous LTE Systems », *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, n° 5, p. 937-946, mai 2013.
- [59] « ATIS Report on Wireless Network Energy Efficiency », Alliance for Telecommunications Industry Solutions ATIS, 2010.
- [60] « Environmental Engineering (EE) Measurement Method for Energy Efficiency of Wireless Access Network Equipment », European Telecommunications Standards Institute, ETSI TS 102 706 V1.2.1.
- [61] « Energy Efficiency for Network Equipment: Two Steps Beyond Greenwashing, White paper », The Energy Consumption Rating Initiative, 2008.
- [62] The Energy Consumption Rating Initiative, « Network and Telecom Equipment-Energy and Performance Assessment », Draft 1.0.4, 2008.
- [63] Verizon NEBS Compliance, « Energy Efficiency Requirements for Telecommunications Equipment », VZ.TPR.9205, 2011.
- [64] « Transmittal of ATIS Energy Efficiencies Specifications ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.itu.int/md/T09-FG.ICT-IL-0003/fr>, consulté le 31 Juillet 2014.
- [65] M. C. Parker et S. D. Walker, « Roadmapping ICT: An Absolute Energy Efficiency Metric », *IEEEOSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 3, n° 8, p. A49-A58, août 2011.
- [66] M. Zekri, B. Jouaber, et D. Zeghlache, « On the use of network QoS reputation for vertical handover decision making », in *2010 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, 2010, p. 2006-2011.
- [67] V. E. Zafeiris et E. A. Giakoumakis, « Towards flow scheduling optimization in multihomed mobile hosts », in *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008*, 2008, p. 1-5.
- [68] V. E. Zafeiris et E. A. Giakoumakis, « Optimized traffic flow assignment in multi-homed, multi-radio mobile hosts », *Comput. Netw.*, vol. 55, n° 5, p. 1114-1131, avr. 2011.
- [69] J. P. Singh, T. Alpcan, P. Agrawal, et V. Sharma, « An Optimal Flow Assignment Framework for Heterogeneous Network Access », in *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2007. WoWMoM 2007. IEEE International Symposium on a*, 2007, p. 1-12.



- [70] H. Sakakibara, M. Saito, et H. Tokuda, « Design and Implementation of a Socket-level Bandwidth Aggregation Mechanism for Wireless Networks », in *Proceedings of the 2Nd Annual International Workshop on Wireless Internet*, New York, NY, USA, 2006.
- [71] K. Chebrolu et R. R. Rao, « Bandwidth aggregation for real-time applications in heterogeneous wireless networks », *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 5, n° 4, p. 388-403, avr. 2006.
- [72] Y. Zhang, C. Wang, et Y. Gao, « Weighted Size-Aware Packet Distribution for Multipath Live Streaming », in *IEEE International Conference on Communications, 2009. ICC '09*, 2009, p. 1-5.
- [73] K. Chebrolu et R. Rao, « Communication using multiple wireless interfaces », in *2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002*, 2002, vol. 1, p. 327-331 vol.1.
- [74] M.-F. Tsai, N. K. Chilamkurti, S. Zeadally, et C.-K. Shieh, « A Concurrent Multi-path Transmission Control Scheme to reduce packet reordering latency at the receiver », in *International Conference on Advanced Technologies for Communications, 2008. ATC 2008*, 2008, p. 437-440.
- [75] C. Pluntke, L. Eggert, et N. Kiukkonen, « Saving Mobile Device Energy with Multipath TCP », in *Proceedings of the Sixth International Workshop on MobiArch*, New York, NY, USA, 2011, p. 1-6.
- [76] J. C. Hosseini et R. L. Armacost, « Using the analytic hierarchy process for strategic and policy decisions in engineering management », in *Technology Management : the New International Language*, 1991, p. 677-.
- [77] « LTE, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical channels and modulation », 3GPP, ETSI TS 136 211, 2008.
- [78] « LTE Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Physical layer procedures (V10.6.0) », 3GPP, TS 36.213, 2012.
- [79] T. Camp, J. Boleng, et V. Davies, « A survey of mobility models for ad hoc network research », *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2, n° 5, p. 483-502, 2002.
- [80] « COST 231 (Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems) », *Scribd*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.scribd.com/doc/17124892/COST-231-Digital-Mobile-Radio-Towards-Future-Generation-Systems>. [Consulté le: 15-juin-2014].
- [81] N. Shabbir, M. T. Sadiq, H. Kashif, et R. Ullah, « Comparison of Radio Propagation Models for Long Term Evolution (LTE) Network », *ArXiv11101519 Cs Math*, oct. 2011.

- [82] L. Wang et D. Binet, « MADM-based network selection in heterogeneous wireless networks: A simulation study », in *1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009*, 2009, p. 559-564.
- [83] M.-A. Tran, N. Boukhatem, et P.-N. Tran, « Game approach to a system of multi-homed mobile terminals », in *Global Information Infrastructure Symposium (GIIS), 2011*, 2011, p. 1-4.
- [84] M. Loukil, B. Jouaber, et D. Zeghlache, « A two-layered virtualization overlay system using software Avatars », in *2010 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2010, p. 1086-1090.
- [85] « Heterogeneous Networks in LTE ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/1576-hetnet>, consulté le 31 Juillet 2014.
- [86] R. Kwan, R. Arnott, R. Paterson, R. Trivisonno, et M. Kubota, « On Mobility Load Balancing for LTE Systems », in *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd*, 2010, p. 1-5.
- [87] K. Son, S. Chong, et G. Veciana, « Dynamic association for load balancing and interference avoidance in multi-cell networks », *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 8, n° 7, p. 3566-3576, juill. 2009.
- [88] A. El-Halaby et M. Awad, « A game theoretic scenario for LTE load balancing », in *AFRICON, 2011*, 2011, p. 1-6.
- [89] V. Noroozi et A. Abbasfar, « Adaptive load balancing in LTE-Advanced networks with base station coordination », in *2013 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2013, p. 1-6.
- [90] J. Wang, J. Liu, D. Wang, J. Pang, et G. Shen, « Optimized Fairness Cell Selection for 3GPP LTE-A Macro-Pico HetNets », in *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2011, p. 1-5.
- [91] R. Han, C. Feng, et H. Xia, « Optimal user association based on topological potential in heterogeneous networks », in *2013 IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2013, p. 2409-2413.

- [92] S. Corroy, L. Falconetti, et R. Mathar, « Cell association in small heterogeneous networks: Downlink sum rate and min rate maximization », in *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2012, p. 888-892.
- [93] K. Son, H. Kim, Y. Yi, et B. Krishnamachari, « Base Station Operation and User Association Mechanisms for Energy-Delay Tradeoffs in Green Cellular Networks », *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, n° 8, p. 1525-1536, sept. 2011.
- [94] « Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios », 3GPP, TR 36.942 V 11.0.0, 2012.
- [95] ETSI TR 103 117, « Environmental Engineering (EE); Principles for Mobile Network level energy efficiency », V1.1.1, 2012.
- [96] J. Hu, Y. Han, et J. Hu, « Topological Potential: Modeling Node Importance with Activity and Local Effect in Complex Networks », in *Second International Conference on Computer Modeling and Simulation, 2010. ICCMS '10*, 2010, vol. 2, p. 411-415.
- [97] B. Jabbari et Y. ZHOU, « Random walk modeling of mobility in wireless networks ».
- [98] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi, et P. Camarda, « Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, n° 2, p. 498-513, févr. 2011.
- [99] A. Chiumento, S. Pollin, C. Desset, L. Van der Perre, et R. Lauwereins, « Analysis of power efficiency of schedulers in LTE », in *2012 IEEE 19th Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*, 2012, p. 1-4.
- [100] D. Sabella, M. Caretti, et R. Fantini, « Energy Efficiency Evaluation of State of the Art Packet Scheduling algorithms for LTE », in *Wireless Conference 2011 - Sustainable Wireless Technologies (European Wireless), 11th European*, 2011, p. 1-4.
- [101] R. Basukala, H. A. Mohd Ramli, et K. Sandrasegaran, « Performance analysis of EXP/PF and M-LWDF in downlink 3GPP LTE system », in *First Asian Himalayas International Conference on Internet, 2009. AH-ICI 2009*, 2009, p. 1-5.
- [102] R. Jain, D.-M. Chiu, et W. R. Hawe, *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system*. Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, 1984.